

闫华敏, 李磊, 李林涛, 等. 基于层次分析法和模糊评价法的中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(1): 79-93.
YAN Huamin, LI Lei, LI Lintao, et al. Suitability assessment on CO₂ storage in offshore basins of China based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(1): 79-93.

基于层次分析法和模糊评价法的中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性评价

闫华敏^{1,2}, 李磊^{1,2*}, 李林涛³, 李彦尊³, 李玲^{1,2}, 张威^{1,2}, 彭晨昂^{1,2}

(1 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;

3 中海油研究总院, 北京 100010)

摘要: CO₂ 排放造成全球气温多变, “多米诺骨牌被推翻”导致一系列环境问题接踵而至, 因此, 开展 CO₂ 海上封存研究对实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。以中国近海盆地为研究对象, 运用层次分析法 (AHP) 和模糊综合评价相结合的方法, 从封存安全性、封存规模、封存可行性 3 方面考虑, 构建了由 3 个一级指标、8 个二级指标组成的 CO₂ 封存适宜性评价指标体系, 对中国近海十大盆地的 CO₂ 封存适宜性进行评价。评价结果显示, 中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性优劣顺序依次为: 珠江口盆地、东海陆架盆地、渤海湾盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地 (莺歌海组)、南黄海盆地、北黄海盆地、琼东南盆地、台西盆地、台西南盆地, 其中, 珠江口盆地和东海陆架盆地可作为 CO₂ 近海封存的首选盆地。

关键词: CO₂ 海上封存; 封存适宜性; 层次分析法 (AHP); 模糊综合评价

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.307

0 引言

近年来, CO₂ 排放量与日俱增, 国际气候委员会 (IPCC) 预测, 2100 年 CO₂ 排放量可能达到 $1.08 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ ^[1]。CO₂ 捕集和封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 技术在国际上已获认可并得到应用, 该技术的应用能够有效缓解 CO₂ 排放的巨大压力, 中国正在积极发展 CO₂ 封存技术, 以应对气候变化、保护环境和提高能源利用率。海洋环境中进行 CO₂ 封存, 不仅使中国有机会参与到国际合作中, 而且对经济、社会的可持续发展具有重要意义^[2]。CO₂ 封存是减少碳排放量的有效途径之一, 选择正

确的存储位置对于提高存储容量、降低 CO₂ 泄漏风险非常重要, 因此, 对 CO₂ 封存场地的适宜性进行合理评估有助于解决这一问题。

封存适宜性取决于多种地质条件和社会经济条件的影响, 包括区域大小、构造稳定性、地热条件、储盖条件、碳排放源距离等^[3]。OLDENBURG 等^[4]基于健康、安全、环境 3 方面, 提出了早期 CO₂ 封存场地的筛选指标体系和方法; BACHU 和 ADAMS^[5-6]基于盆地规模、构造背景、水文地质条件等指标, 对加拿大主要沉积盆地建立了由 15 个盆地级指标组成的地质储量评价指标体系; 何虎军等^[7]以沁水含煤盆地为例, 考虑储盖层条件、地理环境以及经济条件的综合影响因素, 提出了由 23 个指标、5 个指标等级组成的煤层中 CO₂ 封存适宜性分级指标体系; 宋铁军等^[8]基于储存安全性、储存规模、社会环境风险以及经济适宜性, 将灰色关联分析法应用于松辽盆地 33 个次生构造单元的盆地级适宜性评价, 建立了由 16 个指标组成的评价指标体系。世界上许多国家已相继启动了向废弃的油气田、不可开采的煤层、咸水层^[9-10]等封存体注入 CO₂ 的项

收稿日期: 2022-11-14

资助项目: 中海油“十四五”课题“海上 CCUS 上下游一体化技术研究——海上咸水层 CO₂ 封存机理研究” (CCL2022RCPS0144RQN); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划 (YCS22213076)

第一作者: 闫华敏 (1997—), 女, 在读硕士, 主要从事地震解释及 CO₂ 封存适宜性评价方面的研究工作。E-mail: 2521850273@qq.com

* 通讯作者: 李磊 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事地震地质综合解释及海洋沉积方面的研究工作。E-mail: lilei@xsyu.edu.cn

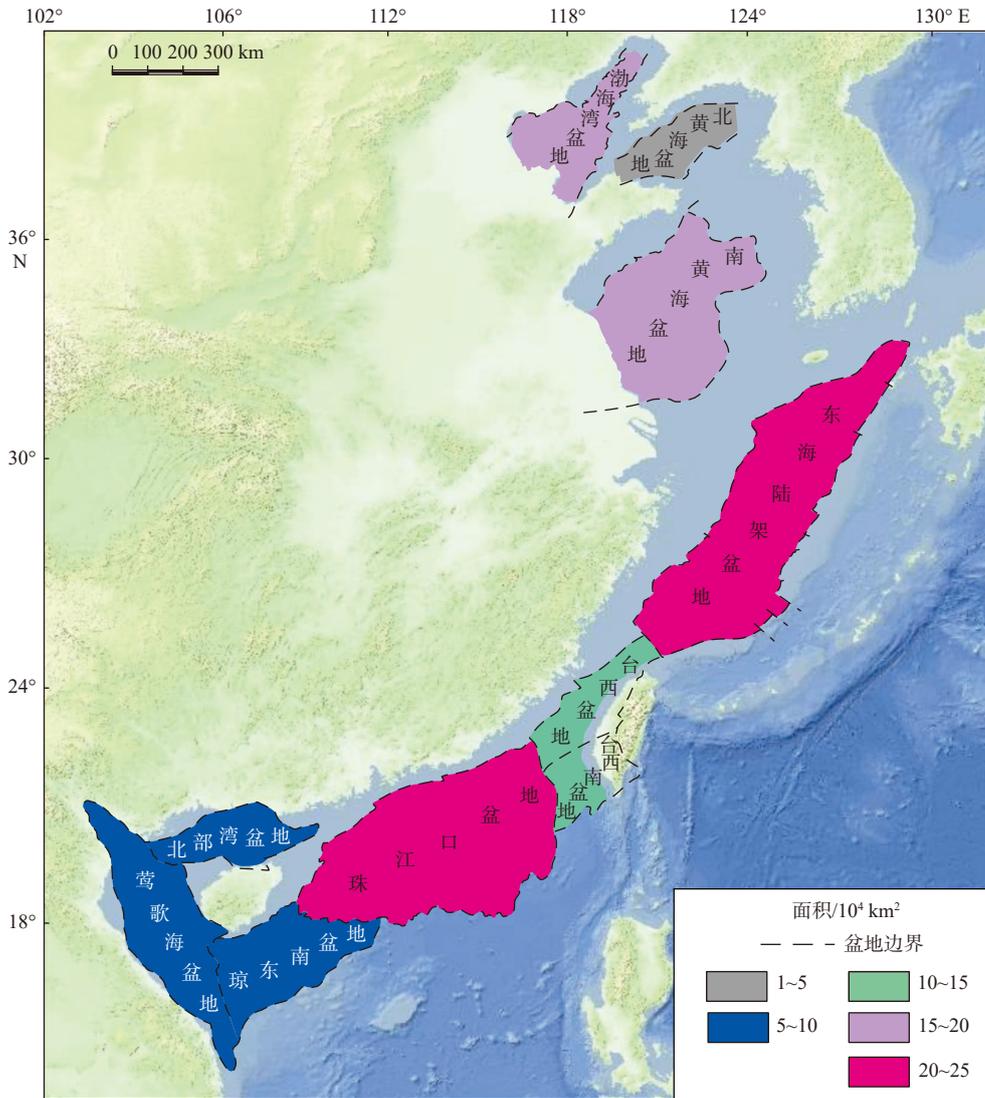
目,以达到长期储存 CO₂ 的目的,如巴西的 Petrobrash 项目、波兰的 Recopol 项目、挪威的海上 Sleipner 和 Snhvit 项目等^[11]。中国的 CO₂ 封存项目起步较晚,且大多处于陆上,尚缺乏在海上进行碳封存的示范项目以及海上 CO₂ 封存、选址经验^[12],尤其是大范围的封存靶区选址。海上可用于封存 CO₂ 的储层巨大,碳储量可达到陆上的数倍,且近海地区工业发达,CO₂ 排放源众多,而近海盆地分布着众多的油气田^[13],可为 CO₂ 封存提供有利条件。

基于此,本文将以中国近海盆地为研究对象,结合研究区实际地质情况,建立适用于中国近海盆地实际条件的 CO₂ 封存适宜性评价指标体系。由于 CO₂ 封存本身存在很多不确定的复杂性因素,评价指标等级的划分和标准的确定都具有模糊性,而

层次分析法(AHP)^[14]可以把定性和定量方法有机结合起来,使复杂问题系统化、简单化,而模糊综合评价法^[15]可以精确处理模糊的评价对象,对模糊信息作出比较合理的量化评价。故选取 AHP 法确定指标权重,再结合模糊综合评价法计算各评价等级的隶属度,对中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性展开初步评价。

1 中国近海盆地 CO₂ 封存概况

中国海域面积辽阔,总面积可达 3.00×10⁶ km²,其中,浅水区面积约为 1.46×10⁶ km²,深水区为 1.54×10⁶ km²。近海主要的沉积盆地自南向北依次有渤海湾盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、东海陆架盆地、台西盆地、台西南盆地、珠江口盆地、北



据文献 [17] 修改

图 1 中国近海盆地面积

Fig.1 The areas of China's offshore basins

部湾盆地、琼东南盆地和莺歌海盆地(莺歌海组)(图 1)^[16]。本文参考相关文献^[11,16], 结合中国近海盆地的综合情况, 充分考虑近海 CO₂ 封存适宜性的诸多影响因素, 本着“在既安全又经济的前提下, 应储尽储”的原则, 从封存规模、封存安全性、封存可行性 3 方面考虑, 认为这些盆地储盖条件良好, 盆地内发育众多背斜、断鼻等类型的大型圈闭^[17-18], 具有大规模封存 CO₂ 的潜力。

1.1 封存规模

1.1.1 盆地面积

盆地面积的大小直接影响 CO₂ 储存量的多少, 从而影响 CO₂ 封存潜力, 盆地面积越大, 越有利于 CO₂ 封存。中国近海盆地总面积为 115.82×10⁴ km², 如图 1 所示, 其中, 珠江口盆地面积为 20.3×10⁴ km², 东海陆架盆地面积为 24.1×10⁴ km², 渤海湾盆地面积为 19.5×10⁴ km², 南黄海盆地面积为 15.1×10⁴ km²,

莺歌海盆地面积为 9.87×10⁴ km², 台西、台西南盆地总面积约为 12.1×10⁴ km², 琼东南盆地面积为 8.30×10⁴ km², 北部湾盆地面积为 5.15×10⁴ km², 北黄海盆地面积为 3.07×10⁴ km²^[17]。

1.1.2 储盖组合

良好的 CO₂ 封存空间首先必须具有良好的封存能力, 储盖组合是影响封存能力的关键, 良好的储盖组合对储层厚度、储层物性以及盖层厚度、连续性等均有要求, 是封存 CO₂ 的重要指标之一。本文利用储层厚度、孔隙度、渗透率、盖层状况这 4 个指标来衡量储盖组合的优劣。储层厚度大小和储层物性(孔隙度和渗透率)好坏直接影响着 CO₂ 的封存能力。目前盖层评价分级标准不一, 本文根据已查阅的文献资料, 以盖层是否连续和有无区域性盖层作为判断盖层状况的依据。根据以上分析, 得到储盖组合指标评价表(表 1)。

表 1 储盖组合评价表

Table 1 Evaluation on the storage and sealing conditions

		评价单元	适宜	较适宜	一般适宜	较不适宜	不适宜
储盖组合	储层条件	储层厚度/m	>1000	500~1000	200~500	100~200	<100
		渗透率/μm ²	>2	1~2	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
		孔隙度/%	>30	20~30	10~20	1~10	<1
	盖层条件	盖层状况	好	较好	一般	差	差

《中国含油气盆地图集》(第 2 版)^[17] 已证实, 珠江口盆地中新统下部珠江组发育海相砂岩和礁灰岩 2 类储层, 珠江组砂岩储层主要由石英组成(80% 以上), 具有较高的成熟度和分选性能, 孔隙度为 21.7%~29.5%, 渗透率为 1.102~1.709 μm², 储层物性特别好。珠江组上部至韩江组下部的较厚泥岩是珠江口盆地的主要盖层。

东海陆架盆地西湖凹陷的花港组储层较厚, 储层物性较好, 孔隙度为 14%~24%, 渗透率为(6~570)×10⁻³ μm², 渐新统花港组上段及中新统龙井组下段发育的泥岩具有良好的封闭能力, 与花港组储层构成了相应的储盖组合; 始新统平湖组孔隙度为 16.28%~25.7%, 渗透率为(7.13~56.75)×10⁻³ μm², 是滨岸、三角洲砂体储层, 本组泥岩可作其盖层。

渤海湾盆地新近系明化镇组和馆陶组的砂岩及砂砾岩为典型的高孔、高渗储层, 其孔隙度为 20%~30%, 渗透率为 0.1~1 μm²; 古近系东营组储层主要为河流三角洲和滨浅湖扇三角洲。明化镇组及东三段泥岩均可作为良好的区域盖层。

北黄海盆地潜在的储层主要是中生界和古近系, 中生界上侏罗统储层主要由细粒砂岩组成, 储层物性较差; 下白垩统储层主要由中-粗砂岩组成, 储层物性较好; 古近系储层主要为厚层砂砾岩和粗砂岩, 孔隙度为 20%~35%, 渗透率为 0.1~5 μm²。上侏罗统、下白垩统顶部和始新统泥岩较发育, 可形成良好的区域盖层。

南黄海盆地阜宁组主要发育水下扇和三角洲, 是主要储层, 阜一段、阜二段砂岩储层与阜三段泥岩盖层组合, 阜三段、阜四段泥岩与其中的水下扇、浊积砂储层组合, 可组成良好的储盖组合; 戴南组为滨浅湖和沼泽相沉积, 砂岩比较发育, 下部河流相砂岩储层与上部河沼相泥岩盖层组成良好的储盖组合。

台西、台西南盆地具有良好的储盖条件。白垩系、古新统、始新统、渐新统和中新统都存在大量砂体。台西盆地新竹等凹陷主要发育渐新统和中新统储层, 为海进砂岩; 台西南盆地主要发育中新统储层, 储集性能较好。上新统锦水组和中新统打

鹿组页岩厚度大,分布稳定,是重要的区域盖层。

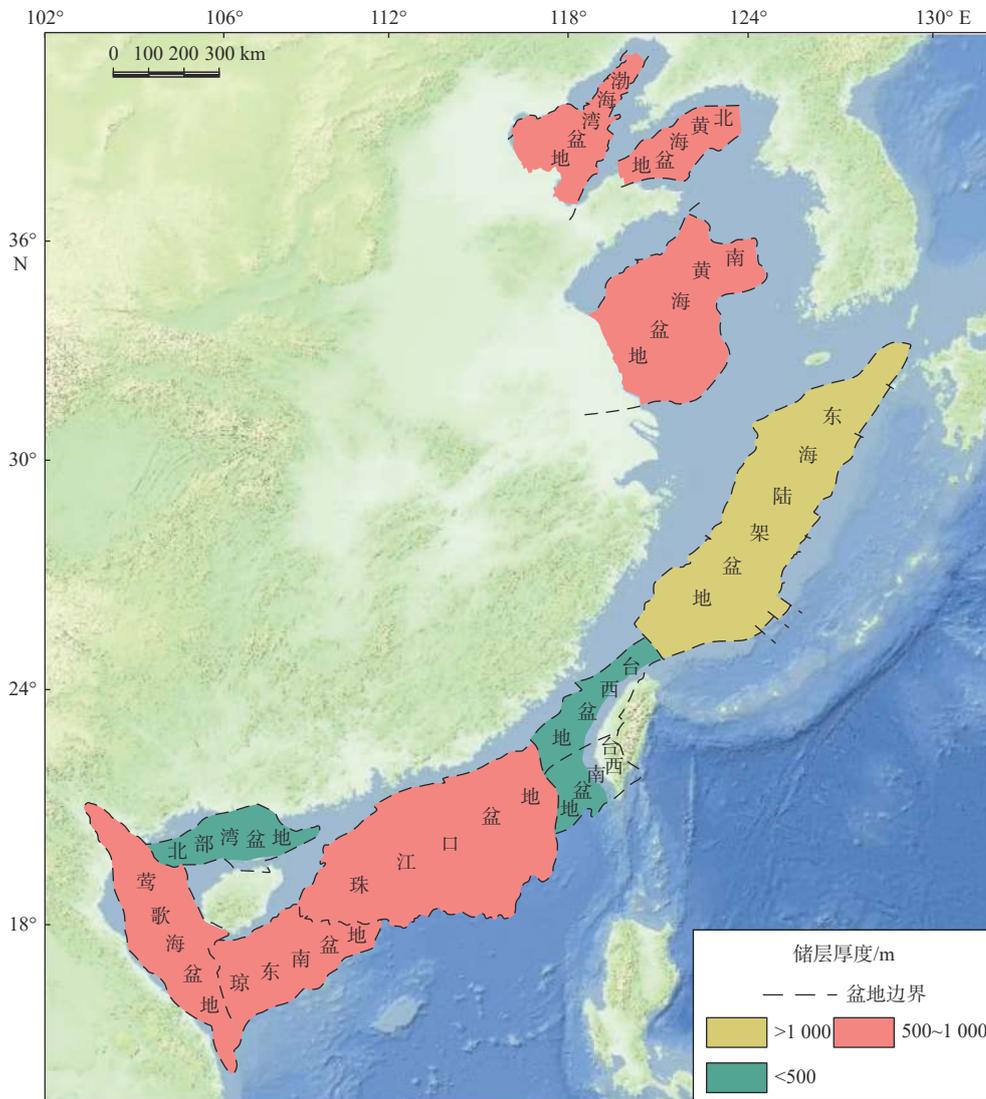
琼东南盆地古近系渐新统陵三段发育扇三角洲砂体,是盆地重要储层,具有良好的物性,孔隙度为14%~20%,渗透率为0.81 μm²(崖城13-1气田);陵水组一段及三亚组、梅山组、黄流组,均发育较厚的海相砂岩储层。梅山组、三亚组、陵水组泥岩占41%~50.9%,可形成区域盖层。

莺歌海盆地莺歌海组主要为浅海相砂岩和深海浊积砂岩储层,孔隙度为22%~25%;莺歌海组二段的泥岩含量大部分>80%,是一套很好的区域

盖层。

北部湾盆地有3类储层:①新近系角尾组、下洋组海相砂岩储层;②古近系流沙港组、涠洲组河湖相砂岩储层;③石炭系石灰岩缝洞型储层。这3类储层均具有良好的储集物性。流沙港组、涠洲组、角尾组等分布较厚泥岩作为区域盖层。

根据以上分析,汇总各盆地储层厚度、孔隙度、渗透率如图2、3所示,此外,近海10个盆地均具有良好的区域性盖层,这为CO₂封存提供了有利的储存环境。



据文献 [17] 修改

图2 中国近海盆地储层厚度

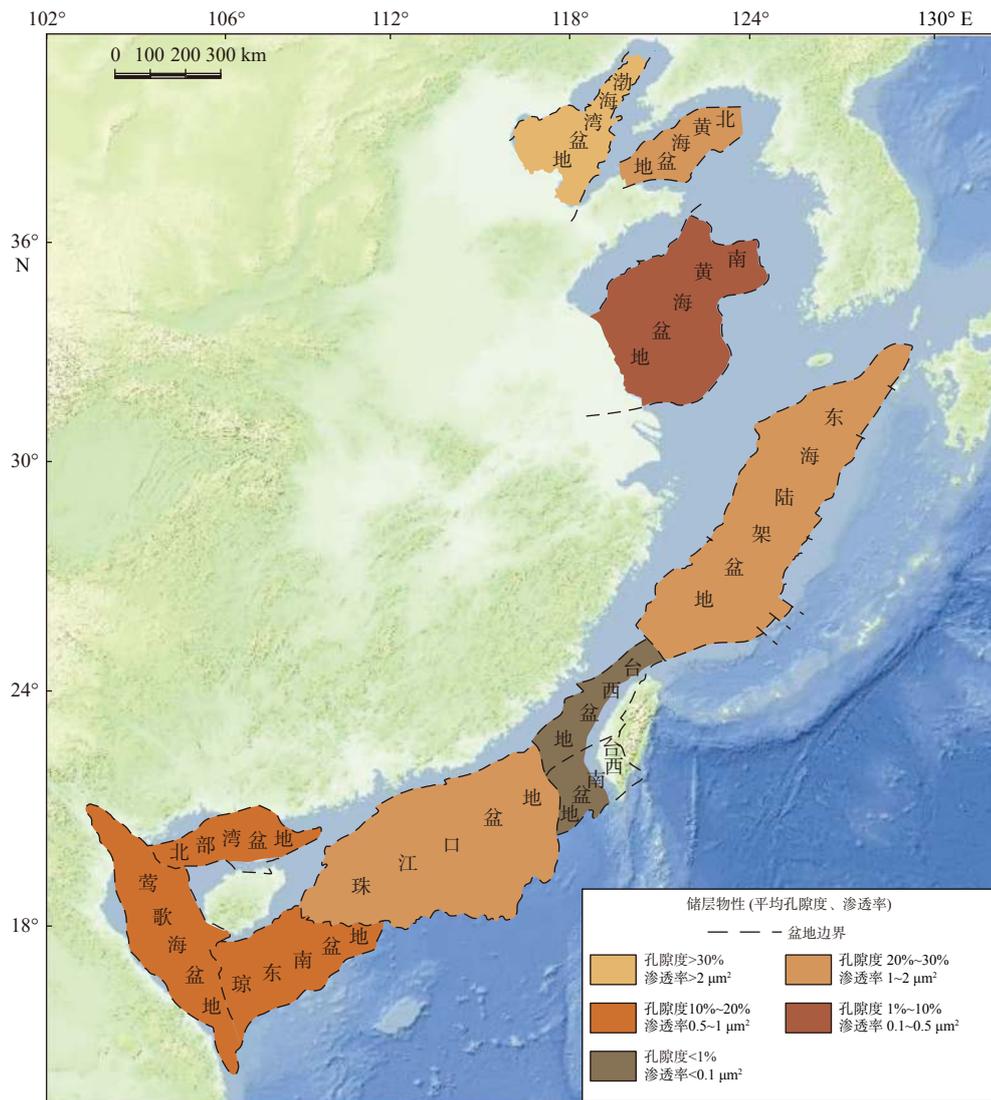
Fig.2 The thickness of CO₂ storage layer in China's offshore basins

1.1.3 地热特征

地热特征包括地温梯度和地热流值。地温梯度越低,储层温度就越低,由于CO₂密度会随着储

层温度的降低而增大,因此,地温梯度较低的冷盆更有利于CO₂封存^[11]。

地面热流和地温梯度的影响机制相似,是地球



据文献 [17] 修改

图 3 中国近海盆地储层物性

Fig.3 Properties of the CO₂ storage layer in China's offshore basins

热量的直接表示,反映该地区的整体地热状况,进而影响了储层的整体热环境^[19]。地热流值越小,表明储层中的热交换越少,从而导致温度变化很小,使储层温度保持稳定,保持较高的 CO₂ 密度,有利于 CO₂ 封存。

就地热特征而言,如图 4、5 所示,中国近海盆地中属于冷盆的有渤海湾盆地、北黄海盆地、南黄海盆地;属于温盆的有东海盆地、台西和台西南盆地;属于热盆的有珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地(莺歌海组)和北部湾盆地^[20-21]。

1.2 封存安全性

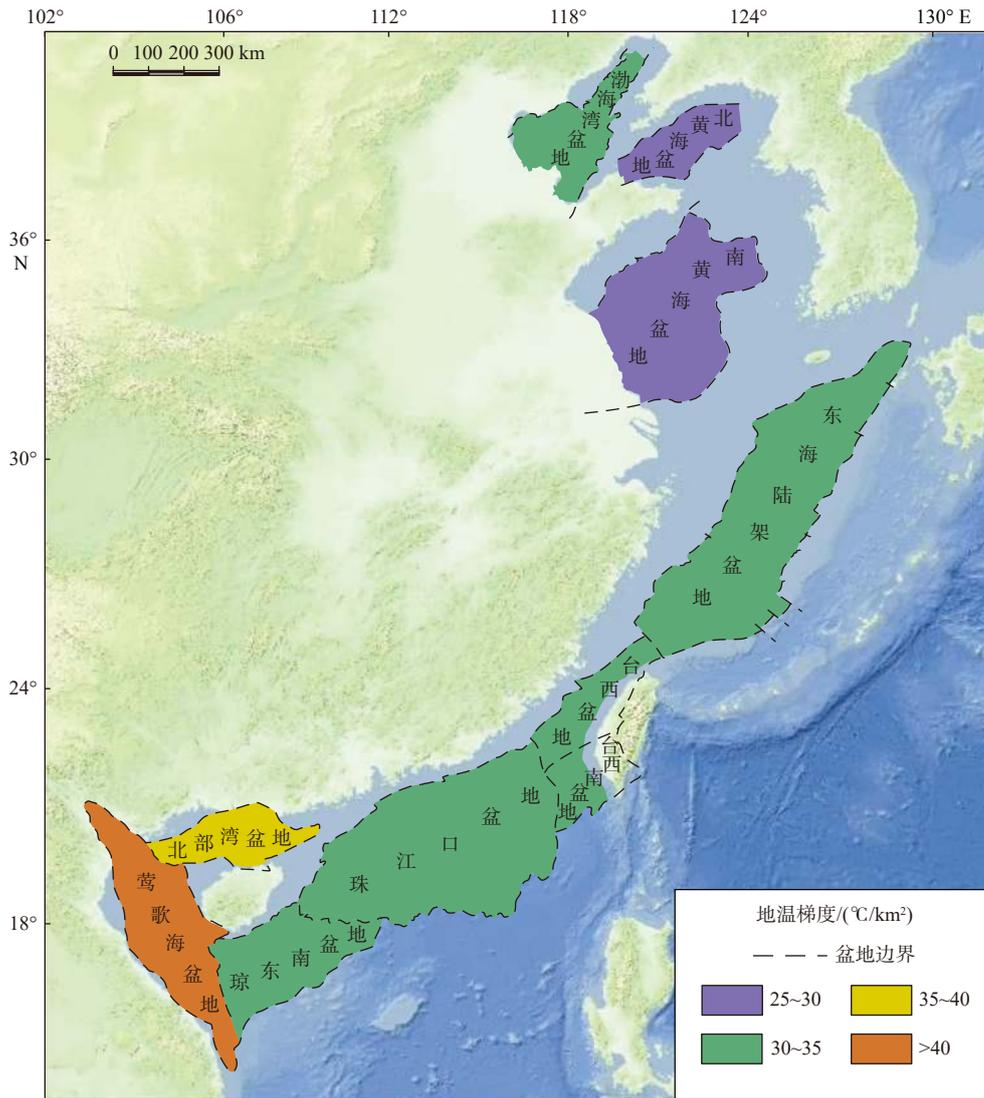
1.2.1 构造背景

盆地的构造背景与区域构造稳定性有关,这关

系到 CO₂ 封存形式、运移过程以及发生泄露的可能性^[22]。中国近海盆地大致可以分为 4 种类型:陆内裂谷盆地、弧后裂谷盆地、被动大陆边缘盆地、走滑拉分盆地。其中,走滑拉分盆地最不稳定,其次是弧后裂谷盆地和被动大陆边缘盆地,最稳定的是陆内裂谷盆地^[16]。图 6 中除莺歌海盆地(莺歌海组)属于走滑拉分盆地外,其余盆地对区域构造稳定性的影响均较小。

1.2.2 地震活动

地震活动直接影响盆地的地壳稳定性,使岩体发生变形,破坏其完整性,从而产生逃逸通道,造成 CO₂ 泄露^[22]。中国近海盆地的强震源主要分布在台湾海峡及其南部(图 6),即台西盆地和台西南盆地,其他盆地地震活动属于中低强度;其中,渤海湾



据文献 [17] 修改

图 4 中国近海盆地地温梯度

Fig.4 Geothermal gradient of China's offshore basins

盆地、北黄海盆地和南黄海盆地的地震活动较其他盆地强烈,特别是渤海湾盆地^[23]。

1.2.3 断裂活动

活动断层是指晚更新世以来,特别是全新世以来一直活动的断层。对于断层活动时代,根据《活动断层预测》(GB/T 36072—2018)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局)的相关规定,断层活动性由强到弱的顺序为:全新世断层、晚更新世断层、早中更新世断层和前第四纪断层^[23]。活动断层会导致 CO₂ 通过断层逃逸到大气中去,从而增加 CO₂ 泄露风险,应摒弃距离活动断层 25 km 内的盆地^[24]。就断层分布及其活动强度而言(图 6),中国近海盆地除台西、台西南盆地断层活动剧烈外,其余盆地断层活动性中等,断裂密度中等偏下。

1.3 封存可行性

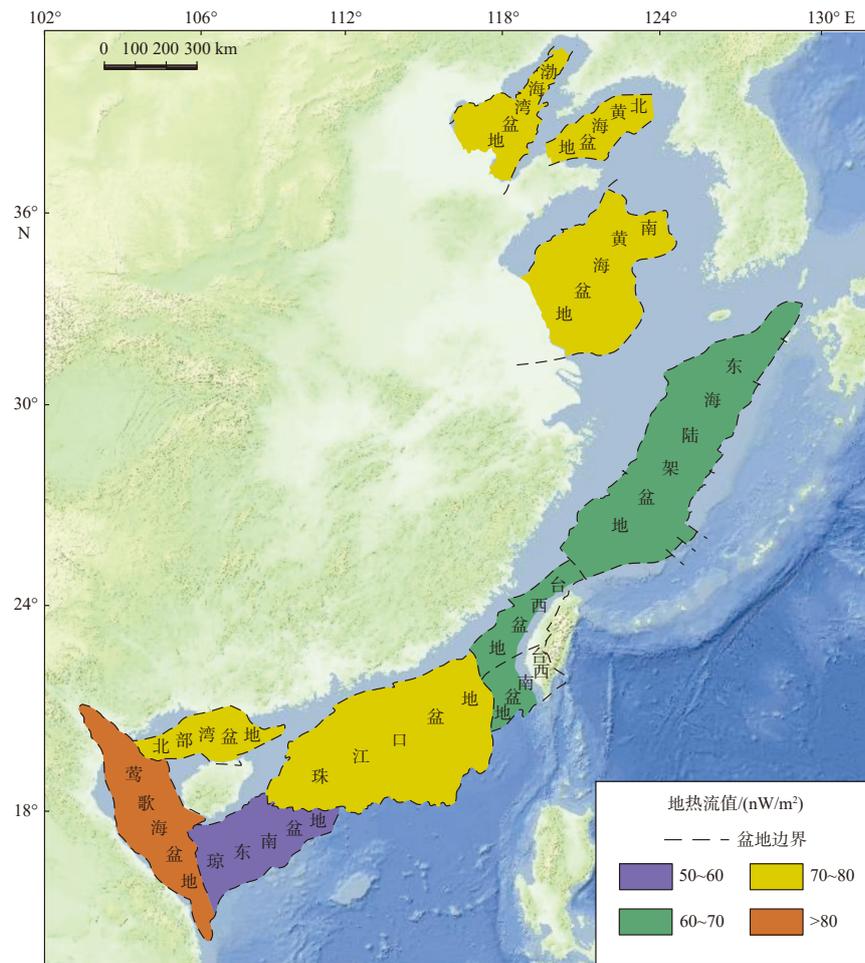
1.3.1 碳排放源

CO₂ 集中排放源是实施 CO₂ 封存的主要目标,为了解中国 CO₂ 源分布特征,绘出大规模和高浓度 CO₂ 源分布图(图 7)。

中国海岸线绵长,近岸海上开发及在建的油气田众多,自然条件对实现 CO₂ 海底封存有利;沿岸油气区适用于 CO₂ 捕获的排放源众多,运输距离短,运输成本相对较低。这些条件都适宜实施 CO₂ 海上封存^[16]。

1.3.2 水深

水深条件是近海盆地独特的一个重要因素,对封存规模、经济性均有影响。水深对海底表层温度



据文献 [17] 修改

图 5 中国近海盆地地热流分布

Fig.5 Heat flow in China's offshore basins

有影响,水深越大越有利于增加封存容量,但同时造成了封存操作的技术障碍和作业成本越来越大,两者对整个封存性能的影响互为消长^[16]。鉴于水深影响的复杂性,这里只考虑水深的成本因素。水深 300 m 以内,对操作性的影响可以不予考虑,水深 300 m 以上,作业成本加剧^[16]。如图 7 可知,中国近海盆地水深基本都位于 300 m 以内,这在一定程度上大大节约了 CO₂ 封存成本。

2 CO₂ 封存适宜性评价方法

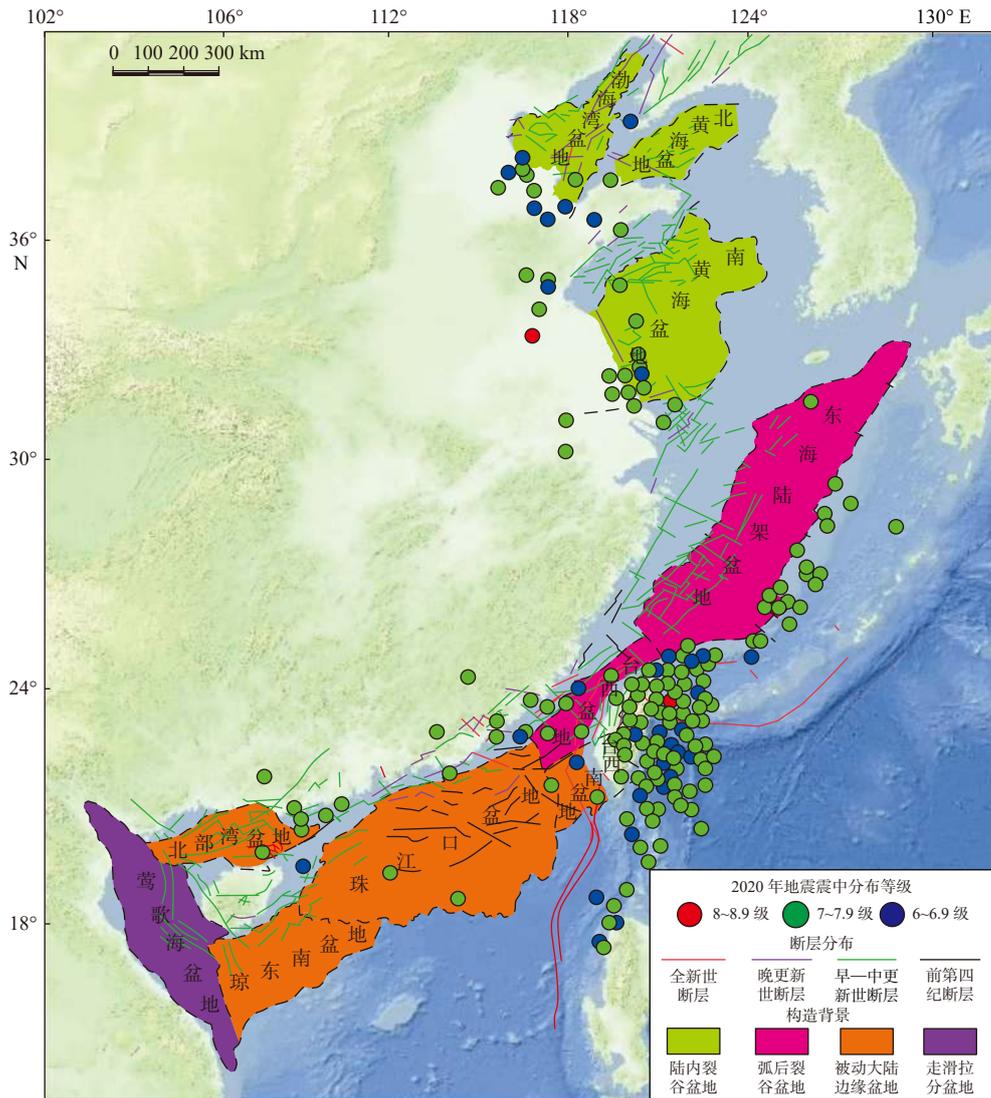
2.1 AHP 基本原理

层次分析法^[14](AHP)是匹兹堡大学在 1970 年代初期开发并在 1980 年代初期引入中国,用于国家宏观经济决策的定性和定量、系统和分层分析过程的组合。特别适用于难以使用定量指标分析的

复杂问题。其应用原理为将某一问题的因素之间的相关关系进行条理化后进行层次划分,通过各层之间要素的比较矩阵,利用数学方法对每一层元素的重要性进行分析,然后确定每一个要素对于目标的重要性。该方法的步骤大致为:①分析各指标之间的关系,建立系统的层次结构;②对判断矩阵中同级别指标的重要性进行成对比较;③利用判断矩阵计算各指标的权重并进行一致性检验。

2.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[15]是一种基于模糊数学的综合评价方法,其根据模糊数学隶属度理论把定性评价转化为定量评价,对受多种因素制约的对象做一个总体评估。它将模糊变换理论和最大隶属度定律应用于各种因素的综合评价,根据模糊评价结果,可以确定各种备选方案的优先级别,以此作为决策者的参考。



据文献 [17] 和 [20] 修改

图 6 中国近海盆地构造稳定性

Fig.6 The tectonic stability in China's offshore basins

2.3 评价方法与步骤

(1) 确定评价指标体系

反映评价目标的指标种类繁多且相互之间存在着复杂的因果关系。首先是确定目标,然后根据这个目标去探索各种影响因子,厘清其内在联系,最后利用结构层次表现各因子之间的作用关系,从而完成评价指标体系的建立。

(2) 构造判断矩阵

层次分析法以人们对各层次、各因素相对重要性的判断作为信息基础。这些判断用值来表示,并用矩阵的形式表示,称为判断矩阵。在表 2 所示的判断矩阵中,指标 B_i 和指标 B_j 的相对重要性可以用 B_{ij} 表示。根据表 2 中层次分析法的比例,数字

1~9 用来代表每个层次因素的相对重要性(表 3)。由于各指标的相对重要性缺乏具体的数据支持,本文根据所掌握和了解的信息对判断矩阵赋值。

判断矩阵满足公式:

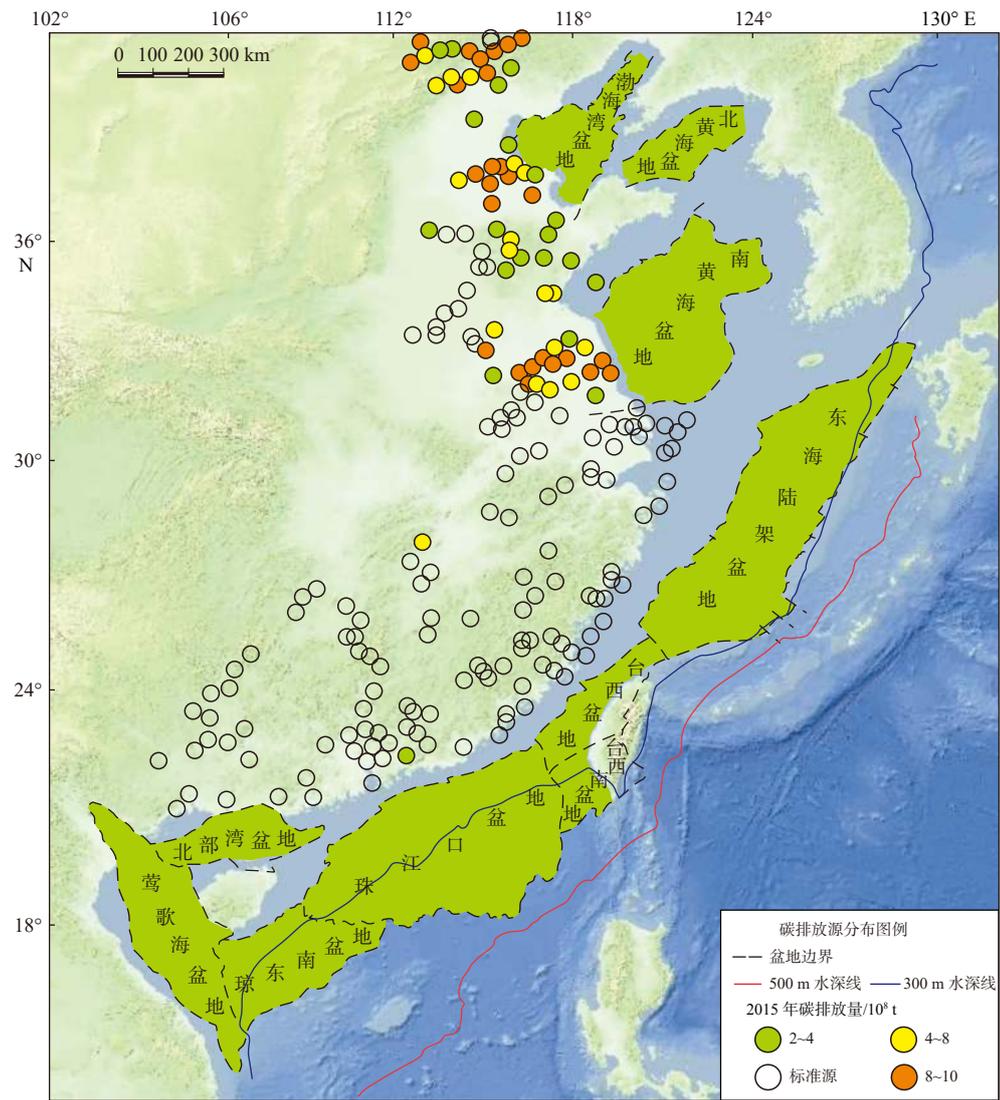
$$B_{ji} = \frac{1}{B_{ij}} > 0, B_{ii} = 1 \quad (1)$$

式中: B_{ij} 和 B_{ji} 为两指标间的相对重要程度。

根据对 CO_2 封存适宜性评价指标体系的分析 and 上文建立的判断矩阵标度,结合 CO_2 封存场地实际情况,征求多位专家意见,邀请实际工作人员参与评价,建立各级指标之间的判断矩阵。

(3) 计算每个指标的权重

计算矩阵每行乘积的 n 次方根,得到一个 n 维向量(\bar{W}_i):



据文献 [17] 修改

图 7 中国近海盆地碳排放源分布

Fig.7 Distribution of carbon emission sources from China's offshore basins

表 2 准则层判断矩阵

Table 2 Judgment matrix for criterion layer

<i>A</i>	<i>B</i> ₁	<i>B</i> ₂	...	<i>B</i> _{<i>n</i>}
<i>B</i> ₁	<i>B</i> ₁₁	<i>B</i> ₁₂	...	<i>B</i> _{1<i>n</i>}
...
<i>B</i> _{<i>n</i>}	<i>B</i> _{<i>n</i>1}	<i>B</i> _{<i>n</i>2}	...	<i>B</i> _{<i>n</i><i>n</i>}

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n B_{ij}} \quad (2)$$

将向量标准化后即得权重向量, 得到权重 (*W_i*):

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (3)$$

(4) 一致性检验

为了评估层次排序的影响, 对判断矩阵的一致性进行了测试。本文使用随机一致性比(CR)来评

表 3 重要性标度及含义

Table 3 The scale and meaning of the importance

重要性标度	含义
1	两者相比, 两个元素具有同等重要性
3	两者相比, 前者比后者稍重要
5	两者相比, 前者比后者明显重要
7	两者相比, 前者比后者强烈重要
9	两者相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述判断的中间值

估。如果 CR < 0.1, 说明判断矩阵具有令人满意的一致性。获得 CR 的第 1 步是计算最大特征根 (λ_{\max}) 和一致性指数(CI), 如下所示:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中: λ_{\max} 表示判断矩阵的最大特征根;

n 为判断矩阵的阶数;

AW 为判断矩阵标准化后的权重按行累加的值。

随机一致性指数(RI)通过查表可知,不同阶数 n 对应的 RI 值如表 4 所示。

表 4 一致性指标 RI 值

Table 4 The RI values of consistency index

n	RI	n	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

比较 CI 和 RI, 得到检验一致性比(CR), 如公式(6)所示。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 判断矩阵满足一致性, 排序权重可以接受。

(5) 模糊综合评价法构造模糊矩阵

确认隶属度时, 由于二级指标体系中的指标都具有模糊性, 因此通过各等级的隶属度来削弱每一个指标隶属的模糊性, 确保结果的准确性。通过对各个指标进行分级, 然后请专家和专业人员分别对指标进行投票, 汇总统计, 即专家组总人数为 N , 第 i 个指标投 j 级别的人数为 n_{ij} , 则其隶属度为 $r_{ij} = n_{ij}/N$, 得到指标模糊评价结果。求出上述所有指标的隶属度, 并对其进行归一化处理后, 得到模糊矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将所有元素的权重 W 与模糊矩阵 R 复合运算, 得到模糊综合评价集 B , 具体如下:

$$B = W \times R = (w_1, w_2, \dots, w_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (8)$$

得到的 b_j 为 CO_2 封存适宜性对评判论域中第

j 个适宜性程度的隶属度。

(6) 综合评价结果分析

对模糊综合评判集 B 的每一个等级赋予相应的分值, 根据评判集中的隶属度, 运用加权评分法计算总分 x_i , 即:

$$x_i = \sum_{j=1}^n b_j p_j \quad (9)$$

式中: x_i 为第 i 个评价对象的 CO_2 封存适宜性综合得分;

p_j 为第 j 个适宜性程度的相应分值。

依次求出各个盆地的模糊综合评判集和综合得分, 依据总分进行排序, 得到最终评价结果。

3 近海盆地 CO_2 封存适宜性评价

封存适宜性是指基于多种因素的制约下, 如封存安全性、规模、社会环境、法律法规、经济成本等, 进一步判断一个地质系统或其不同的构造单元是否适合开展 CO_2 封存的能力。评价指标的选取要遵循科学合理的原则, 因为这直接影响到评价结果是否可以准确地适用于项目的顺利开展。

3.1 数据来源

本研究中各项评价指标参数的确定是在大量文献调研基础上给出的, 其中, 封存安全性指标、封存规模性指标和封存可行性指标参数分别由参考文献 [20,23,25]、[16-18] 和 [26] 获得。

3.2 评价指标体系及分级标准

(1) CO_2 封存适宜性评价指标体系的建立

借鉴前人 BACHU 等^[5-6] 在 2003 年提出的区域级封存适宜性评价指标体系, 结合研究区本身的地质条件, 以中国近海 10 个主要盆地为评价对象, 从封存规模、封存安全性、封存可行性 3 个方面, 建立了 8 个二级指标构成的全海域级 CO_2 封存适宜性评价指标体系(图 8)。

(2) 评价指标分级标准

评价 CO_2 封存适宜性是一个涉及多层次、多角度、多因素的全方位综合评价过程, 结合中国近海 10 个主要盆地的实际情况和评价工作的实际需要, 将评价指标划分为适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜、不适宜 5 个等级, 其分别对应相应的地质条件(表 5)。

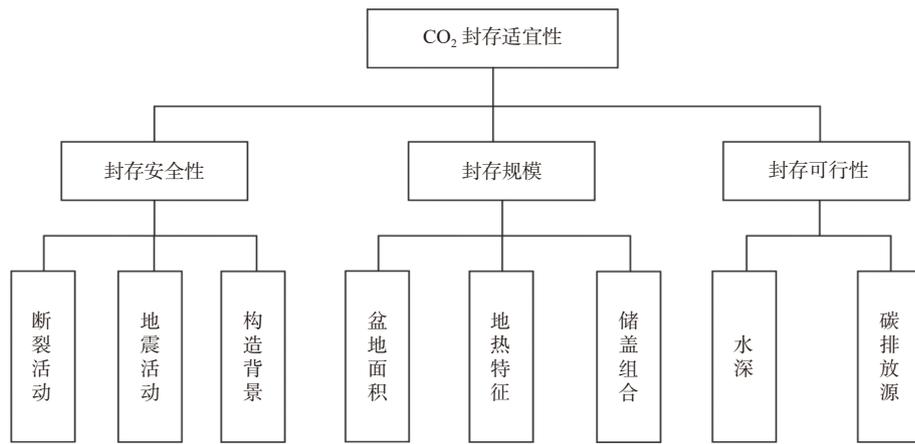


图 8 CO₂ 封存适宜性评价指标体系

Fig.8 Evaluation index system of CO₂ storage suitability

表 5 CO₂ 封存适宜性评价指标分级

Table 5 Classification of evaluation indices to CO₂ storage suitability

一级指标	二级指标	适宜	较适宜	一般适宜	较不适宜	不适宜
封存安全性	断裂活动	有限断层和裂缝		中等断层、中等裂缝		大断层、大裂缝
	地震活动	无	偶尔/很少	中等	较频繁	频繁
	盆地类型	陆内裂谷盆地	被动大陆边缘盆地	弧后裂谷盆地	走滑拉分盆地	
封存规模	地热特征	地温/℃	<30	30~40		>40
		热流/(Nw/m ²)	50~70	70~80		>80
	盆地面积/10 ⁴ km ²	20~25	15~20	10~15	5~10	1~5
	储层厚度/m	>1000	0.5~1	200~500	100~200	<100
	储盖组合	渗透度/μm ²	>2	1~2	0.5~1	0.1~0.5
孔隙度/%		>30	20~30	10~20	1~10	<1
封存可行性	碳排放源/10 ⁶ t	好	较好	一般	差	差
		盖层	好	较好	一般	差
	水深/m	>1 000	300~1 000	100~300	0~100	0
		极浅, <300	浅, 300~500	中等, 500~800	较深, 800~1000	深, >1 000

3.3 构造判断矩阵

基于前述建立的 CO₂ 封存适宜性评价体系 (图 8), 并通过咨询相关工程技术人员及科研专家, 将封存安全性、封存规模、封存可行性的指标体系进行两两对比, 构建如下各级指标体系的判断矩阵 (表 6~9):

表 6 一级指标两两判断矩阵

Table 6 Level 1 index judgment matrix

一级指标	封存安全性	封存规模	封存可行性
封存安全性	1	1/3	2
封存规模	3	1	3
封存可行性	1/2	1/3	1

表 7 封存安全性指标两两判断矩阵

Table 7 Storage safety index judgment matrix

封存安全性	断裂活动	地震活动	构造背景
断裂活动	1	1/3	1/2
地震活动	3	1	2
构造背景	2	1/2	1

3.4 计算评价指标权重并检验一致性

根据 2.3 中的公式(2)和(3), 计算各级评价指标在其层次内的权重, 反映各评价指标对上一层评价指标的相对重要程度, 确定评价指标权重也叫层次单排序。然后逐级进行一致性检验, 确保达到合理的一致性, 具体如表 10。

表 8 封存规模指标两两判断矩阵

Table 8 Storage scale index judgment matrix

封存规模	储盖组合	地热特征	盆地面积
储盖组合	1	4	1/2
地热特征	1/4	1	1/4
盆地面积	2	4	1

表 9 封存可行性指标两两判断矩阵

Table 9 Storage feasibility index judgment matrix

封存可行性	碳排放源	水深
碳排放源	1	1/2
水深	2	1

表 10 各级 CO₂ 封存适宜性评价指标对目标层的权重Table 10 The weight of CO₂ storage suitability evaluation index at all levels to the target layer

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重
CO ₂ 封存适宜性	封存安全性	0.2518	断裂活动	0.0412
			地震活动	0.1357
			构造背景	0.0749
	封存规模	0.5889	地热特征	0.0650
			盆地面积	0.3202
			储盖组合	0.2037
	封存可行性	0.1593	碳排放源	0.0531
			水深	0.1062

由公式(6)可以得出,一级指标的一致性比例 CR=0.0518, <0.1, 满足一致性检验。然后对其余二级指标进行一致性检验,也均<0.1。

根据以上 AHP 法确定的各项指标权重可以看出(表 10),封存规模在一级指标中占比最大,其中,盆地面积有较为突出的作用;地震活动对封存安全性有显著影响;水深在封存可行性中最重要的。

3.5 构造模糊子集及模糊矩阵

根据中国近海十大盆地的实际地质概况,确定所有影响因素的隶属度,进而求得 8 个单因素评判模糊子集,以渤海湾盆地为例,求得其对应的模糊子集为 $R_1 \sim R_8$, 分别代表盆地面积、水深、构造背景、地热特征、断裂活动、地震活动、碳排放源及储盖组合 8 个因素,见公式(10):

$$\begin{aligned}
 R_1 &= (0.25, 0.5, 0.25, 0, 0) \\
 R_2 &= (0.5, 0.5, 0, 0, 0) \\
 R_3 &= (0.5, 0.25, 0.25, 0, 0) \\
 R_4 &= (0.375, 0.375, 0.25, 0, 0) \\
 R_5 &= (0, 0.25, 0.625, 0.125, 0) \\
 R_6 &= (0.125, 0.25, 0.5, 0.125, 0) \\
 R_7 &= (0.375, 0.5, 0.125, 0, 0) \\
 R_8 &= (0.125, 0.5, 0.375, 0, 0)
 \end{aligned} \quad (10)$$

将 8 个单因素评判模糊子集组合,构造得到模糊矩阵 R 。根据 AHP 确定的近海盆地 CO₂ 封存影响因素权重集合 W 视为 1×8 的矩阵,模糊综合评价得出的模糊矩阵 R 视为 8×5 的矩阵,进而矩阵乘积复合运算得到模糊综合评判集 $B=(0.257, 0.429, 0.292, 0.022, 0)$ 。依次计算其余 9 个盆地的模糊综合评价集(表 11)。

表 11 中国近海盆地等级隶属度

Table 11 Grade membership of offshore basin in China

盆地名称/等级	适宜	较适宜	一般适宜	适宜	不适宜
渤海湾盆地	0.257	0.429	0.292	0.022	0
北黄海盆地	0.209	0.256	0.321	0.173	0.04
南黄海盆地	0.182	0.27	0.452	0.076	0.02
东海盆地	0.406	0.329	0.251	0.013	0
台西盆地	0	0.195	0.315	0.324	0.165
台西南盆地	0	0.154	0.27	0.289	0.287
珠江口盆地	0.461	0.352	0.187	0	0
琼东南盆地	0.133	0.247	0.412	0.139	0.069
莺歌海盆地(莺歌海组)	0.222	0.311	0.361	0.061	0.046
北部湾盆地	0.255	0.34	0.205	0.16	0.04

依据上述结果,分为 5 个等级赋予分值,适宜为 5 分,较适宜为 4 分,一般适宜为 3 分,较不适宜为 2 分,不适宜为 1 分。根据公式(9)得到最终评价得分,并对其排序(表 12)。

为了更好地表示评价结果,将最终的盆地适宜性排名划分为 I ~ V 类,其中排名前 2 的为 I 类;排名第 3、4 名的为 II 类;排名第 5 的为 III 类;排名第 6~8 的为 IV 类;排名最后 2 名的为 V 类(图 9)。

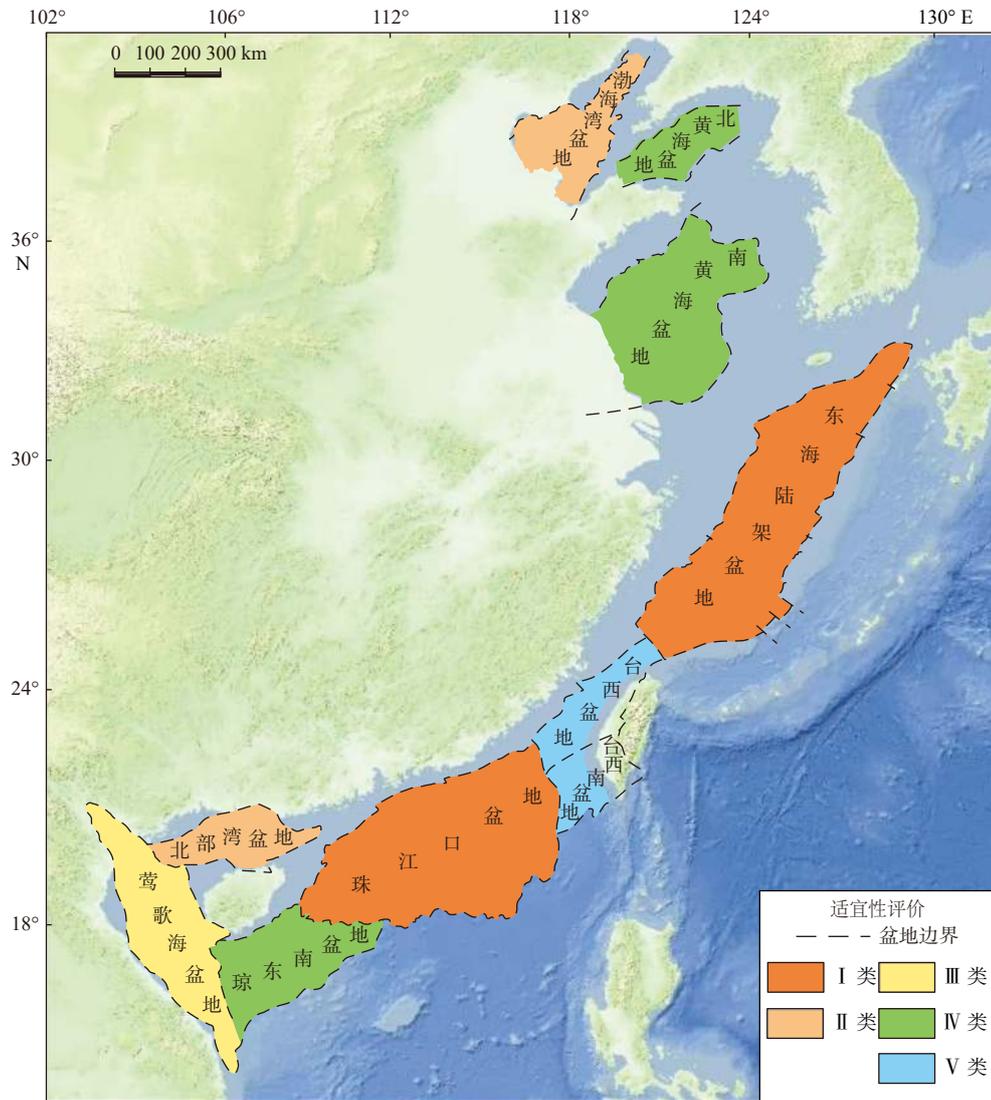
表 12 CO₂ 封存适宜性评价得分

Table 12 CO₂ storage suitability evaluation score

盆地名称	综合得分	排序
珠江口盆地	4.274	1
东海盆地	4.125	2
渤海湾盆地	3.921	3
北部湾盆地	3.610	4
莺歌海盆地(莺歌海组)	3.605	5
南黄海盆地	3.518	6
北黄海盆地	3.418	7
琼东南盆地	3.236	8
台西盆地	2.538	9
台西南盆地	2.291	10

4 评价结果与分析

根据以上评价结果可以看出, 中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性依次为: 珠江口盆地、东海陆架盆地、渤海湾盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地(莺歌海组)、南黄海盆地、北黄海盆地、琼东南盆地、台西盆地、台西南盆地。其中, 北黄海盆地面积较小, 储层物性较差, 封存容量小, CO₂ 运输成本相对较低; 琼东南盆地构造稳定性相对较差且距离碳排放源较远, CO₂ 运输成本高; 南黄海盆地地震活动较强烈且储层厚度和物性比较差; 台西和台西南盆地靠近地震源, 盆地面积小, 储层物性差, 构造不稳定, CO₂ 运输成本高, 考虑到社会经济性和封存潜力等



据文献 [17] 修改

图 9 中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性

Fig.9 Suitability area for CO₂ storage in China's offshore basins

条件,应摒弃这些不利于 CO₂ 封存的盆地。

珠江口盆地、东海陆架盆地可作为 CO₂ 近海封存的首选盆地。珠江口盆地、东海陆架盆地属于近海大型沉积盆地,沉积厚度巨大,具有众多油气藏^[27],储层厚度和物性均较好,存在多套储盖组合,可为 CO₂ 封存提供大量存储空间;盆地构造稳定性良好,不易发生 CO₂ 泄露^[28-29];部分地区水深 <300 m,作业成本小。缺点是 CO₂ 运输距离相对较远,但部分区域仍在经济范围之内。渤海湾盆地、北部湾盆地封存面积略小,但 CO₂ 运输成本较低,构造稳定性中等,具有良好的储层物性,而莺歌海盆地(莺歌海组)虽然构造较复杂,但地震活动较弱且断层活动影响小,总体构造稳定性一般,发育良好的储盖组合,这些盆地均可考虑作为 CO₂ 近海封存的首选盆地。

此评价结果与霍传林^[16]对中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性的研究结论大同小异。霍传林的评价结果显示,珠江口盆地的适宜性最佳,其次是东海陆架盆地,但由于评价对象以及评价指标的不同,其余近海盆地的封存适宜性与本文结果略有偏差。本文的评价结果对于中国海上 CO₂ 封存初步选址具有一定的借鉴意义,未来珠江口盆地、东海陆架盆地能否进行大规模 CO₂ 封存还需进一步深入研究。

5 结论

(1)结合中国近海盆地构造沉积、地热等条件,从封存规模、安全性、可行性3个方面,建立了由8个指标组成的盆地级 CO₂ 封存适宜性评价指标体系,利用 AHP 结合模糊综合评价法对中国近海的十大盆地进行了适宜性评价。研究表明,本文建立的评价指标体系以及 AHP 分析法对 CO₂ 地质封存场地的筛选具有一定的可行性。

(2)由计算出的权重结果可知:封存规模在一级指标中占比最大,盆地面积在封存规模中有较为突出的作用;地震活动对封存安全性有显著影响;水深在封存可行性中最重要的。

(3)评价结果表明,中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性优劣顺序依次为:珠江口盆地、东海陆架盆地、渤海湾盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地(莺歌海组)、南黄海盆地、北黄海盆地、琼东南盆地、台西盆地、台西南盆地。其中,珠江口盆地、东海陆架盆地可作为 CO₂ 近海封存的首选盆地,渤海湾盆地、

北部湾盆地和莺歌海盆地(莺歌海组)可作为候选盆地。

参考文献:

- [1] SAFARZADEH M A, MOTAHHARI S M. Co-optimization of carbon dioxide storage and enhanced oil recovery in oil reservoirs using a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) [J]. *Petroleum Science*, 2014, 11(3): 460-468.
- [2] 霍传林,李官保,潘建明,等.我国开展CO₂海底封存的利弊分析和对策建议[J].*海洋环境科学*, 2014, 33(1): 138-143.
- [3] TANAKA S, KOIDE H, SASAGAWA A. Possibility of underground CO₂ storage in Japan[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6/9): 527-530.
- [4] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, DOBECK L, et al. Modeling gas transport in the shallow subsurface during the ZERT CO₂ release test [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 77-92.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] HE H J, CHONG T, GANG J, et al. Evaluating the CO₂ geological storage suitability of coal-bearing sedimentary basins in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(7): 1-13.
- [8] 宋铁军,万玉玉,张文强,等.基于灰色关联分析法的松辽盆地CO₂地质储存适宜性评价[J].*地质通报*, 2017, 36(10): 1874-1883.
- [9] 张洪涛,文冬光,李义连,等.中国CO₂地质封存条件分析及有关建议[J].*地质通报*, 2005, 24(12): 1107-1110.
- [10] SHUKLAA R, RANJITHA P, HAQUE A, et al. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock heterogeneity [J]. *Fuel*, 2010, 10(89): 2651-2664.
- [11] 王紫剑,唐玄,荆铁亚,等.中国年封存量百万吨级CO₂地质封存选址策略[J].*现代地质*, 2022, 36(5): 1-18.
- [12] 国内首个海上二氧化碳封存示范工程建设完工[J].*中国船检*, 2022(6): 38.
- [13] 张振冬,杨正先,张永华. CO₂捕集与封存研究进展及其在我国的发展前景[J].*海洋环境科学*, 2012, 31(3): 456-459.
- [14] SAATY T L, VARGAS L G. Hierarchical analysis of behavior in competition: prediction in chess [J]. *Behavioral science*, 1980, 25(3): 180-191.
- [15] XU S, CUI Y, YANG C, et al. The fuzzy comprehensive evaluation (FCE) and the principal component analysis (PCA) model simulation and its applications in water quality assessment of Nansi Lake Basin, China [J]. *Environmental Engineering Research*, 2021, 26(2): 200022.
- [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:大连海事大学, 2014.
- [17] 朱伟林,米立军.中国海域含油气盆地图集[M].北京:石油工业出版社, 2010: 25-39.

- [18] 彭伟欣,叶从英. 中国近海油气资源开发现状及前景[J]. 海洋石油, 1999, 19(3): 21-26.
- [19] WANG S J, HU S B, WANG J Y. The characteristics of heat flow and geothermal field in Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(6): 816-824.
- [20] 张功成,陈国俊,张厚和,等. “源热共控”中国近海盆地油气田“内油外气”有序分布[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 119.
- [21] 胡圣标,龙祖烈,朱俊章,等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 178-187.
- [22] 王齐鑫,马传明,花劲健,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.
- [23] 高战武,蔡亚森,钟慧,等. 中国东部海域断裂构造格架与地震活动研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 11-18.
- [24] 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.
- [25] 白冰,李小春,刘延锋,等. 中国CO₂集中排放源调查及其分布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2918-2923.
- [26] 秦长文,肖钢,王建丰,等. CO₂地质封存技术及中国南方近海CO₂封存的前景[J]. 海洋地质学, 2012, 28(9): 40-45.
- [27] 可行,陈建文,龚建明,等. 珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 55-65.
- [28] 张宽,胡根成,吴克强,等. 中国近海主要含油气盆地新一轮油气资源评价[J]. 中国海上油气, 2007, 19(5): 289-294.
- [29] 可行,陈建文,龚建明,等. 东海陆架盆地CO₂地质封存适宜性评价[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 1-12.

Suitability assessment on CO₂ storage in offshore basins of China based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation

YAN Huamin^{1,2}, LI Lei^{1,2*}, LI Lintao³, LI Yanzun³, LI Ling^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, PENG Chen'ang^{1,2}

(1 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2 Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China; 3 CNOOC Research Institute, Beijing 100010, China)

Abstract: CO₂ emissions lead to global temperature changes and “dominoes are overturned”, triggering a series of environmental problems one after another. Therefore, CO₂ offshore storage is an important issue to achieve the goal of “carbon peak and carbon neutrality”. Taking China offshore basins as the research object, the method of AHP (analytic hierarchy process) and fuzzy comprehensive evaluation was used, three aspects of storage security, storage scale and storage feasibility were considered, and a CO₂ storage suitability evaluation index system was constructed with three first-level indicators and eight second-level indicators, upon which the CO₂ storage suitability and favorable areas of 10 offshore basins in China was assessed. Results shows that the offshore basin CO₂ suitability in a descendant order is: Pearl River Mouth Basin, East China Sea Shelf Basin, Bohai Bay Basin, Beibu Bay Basin, Yinggehai Basin (Yinggehai Formation), South Yellow Sea Basin, North Yellow Sea Basin, Qiongdongnan Basin, Taixi Basin, and Southwest Taiwan Basin. Among them, the Pearl River Mouth Basin and the East China Sea Shelf Basin can be regarded as the preferred basins for CO₂ offshore storage.

Key words: CO₂ offshore storage; storage suitability; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation