



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

海上 CO₂ 咸水层封存场地适宜性评价规范

Suitability evaluation guideline of CO₂ storage site in offshore saline aquifers

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 评价目的和流程 2

5 评价内容及指标 3

6 场地适宜性评价方法 4

附 录 A （资料性） 常用海上 CO₂ 咸水层封存适宜性评价相关数据表 8

参 考 文 献 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国标准化研究院标准化委员会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

海上 CO₂ 咸水层封存场地适宜性评价方法

1 范围

本文件规定了海上CO₂咸水层封存场地适宜性的评价目的和流程、内容及指标和方法。
本文件适用于海上CO₂咸水层封存场地适宜性评价和选区评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 17741 工程场地地震安全性评价
SY/T 6942 石油天然气盖层评价方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

海上封存场地 offshore storage site

封存地质体或地下空间以及用于开发二氧化碳注入设施并进行封存活动（包括监测）的海洋区域。

3.2

海上封存适宜性 offshore storage suitability

实施二氧化碳海上地质封存的地质体或地下空间储集条件、地质安全性条件以及海洋工程条件和社会经济条件等。

3.3

咸水层 saline aquifer

特指沉积盆地内适宜二氧化碳地质封存的高孔隙含水地层，赋存深度一般在800 m以下，矿化度3 g/L以上。

3.4

储层 reservoir

具有大量孔隙且孔隙之间具有连通性的能够注入和储存二氧化碳的岩层。

3.5

储层条件 storage condition

储层能够渗流和封存二氧化碳的条件或能力。

3.6

地质封存体 geological storage

地下能满足二氧化碳封存的独立地质单元。该单元具有独立的水动力系统和压力系统。

3.7

封存潜力 storage potential

在不导致地质封存体破坏的条件下，储层可以容纳的二氧化碳最大质量。

3.8

可注入性 injectivity

向储层注入二氧化碳的容易程度。

3.9

盖层 caprock

位于储层之上，二氧化碳等流体难以进入并流动的岩层。

3.10

封闭性 sealing property

盖层、断层等对二氧化碳等流体运移渗透的阻碍性能。

3.11

安全性 geological safety

二氧化碳在封存地质体中长期稳定封存，不发生泄漏的性能。

3.12

碳源 carbon sources

工业生产过程中向大气排放二氧化碳的发生地。

4 评价目的和流程

4.1 评价目的

在方案或项目早期规划阶段，对一个或多个海上封存场地的海上CO2封存适宜性进行评价，为后续预可行性研究及可行性研究等筛选潜在封存场地提供依据。

4.2 评价流程

- a) 资料收集；
- b) 基础条件评估；
- c) 建立评价指标体系；
- d) 确定各评价指标权重；
- e) 评价场地适宜性。

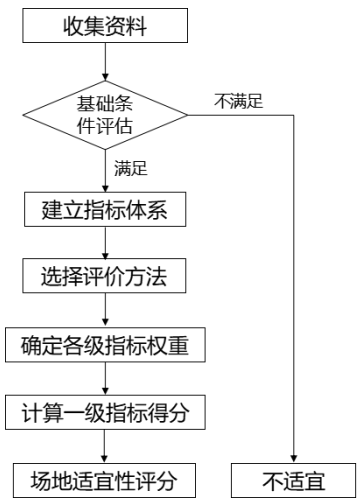


图 1 适宜性评价流程示意图

5 评价内容及指标

5.1 评价基础条件

封存场地需满足以下各项评价基础条件，然后再根据评价指标开展适宜性评价：

- a) 满足所需的CO₂注入规模和注入能力；
- b) 盖层、断层、已钻井全部达到封闭要求；
- c) 未处于地震活跃区；
- d) 具备必须的和可靠基础地质资料。

5.2 评价指标

封存场地适宜性评价包括封存潜力评价、封存安全性评价、环境经济和技术可行性评价、资料基础评价等四个方面，共八项基本评价条件。八项评价条件和指标可参考附录 A 中表 A.1 中给出的封存场地的推荐指标及优劣划分。

5.3 圈闭条件

评价圈闭条件包括以下指标：

- a) 圈闭类型：背斜圈闭封存效果优于断背斜、断鼻等构造圈闭。
- b) 圈闭面积：构造圈闭或储层等封存体的平面展布面积，是评价封存规模的重要条件。
- c) 高点埋深：高点埋深宜大于 800 米。
- d) 圈闭形态：单个圈闭高点为宜。
- e) 圈闭可靠性：须综合地震等资料对圈闭落实程度进行判断。
- f) 地震历史记录：历史地震级数大于 9 级，则地层稳定性差，不宜封存。

5.4 储层条件

评价储层条件包括以下指标：

- a) 储层埋深：储层埋深应满足 CO₂ 封存相态要求，宜大于 800 米。
- b) 储层厚度：储层层段总厚度宜大于 500 米。
- c) 储层砂地比：储层砂地比宜大于 30%。
- d) 储层孔隙度：储层孔隙度宜大于 10%。
- e) 储层渗透率：储层渗透率宜大于 100mD。
- f) 储层压力系数：较低的初始储层压力系数有利于 CO₂ 的注入。
- g) 地温梯度：较低的储层温度条件下，CO₂ 密度较大，有利于提高 CO₂ 封存容量。

5.5 盖层条件

评价盖层条件包括以下指标：

- a) 盖层岩性：膏盐类盖层封存效果优于泥质岩类盖层，泥质岩类盖层封存效果优于页岩/致密砂岩类盖层。
- b) 盖层厚度：盖层厚度应满足封闭性要求，层段总厚度宜大于 300 米。
- c) 盖层渗透率：盖层渗透率宜小于 1mD。
- d) 盖层泥地比：盖层泥地比宜大于 40%。
- e) 纵向分布特征：至少有一套储盖组合，多套储盖组合更有利于阻止 CO₂ 的泄漏逃逸。
- f) 盖层连续性：在 CO₂ 羽流扩展范围内，盖层须稳定连续分布。评价方法遵照 SY/T 6942 的规定。

5.6 断裂条件

评价断裂条件包括以下指标：

- a) 断裂数量：断裂数量反映了封存场地范围内潜在泄漏途径的多少。
- b) 断穿盖层断裂数量：断穿盖层断裂数量反映了CO₂突破盖层泄漏的风险。
- c) 断层封闭性：断层宜无侧向和垂向泄漏逃逸风险。

5.7 老井条件

评价已钻井条件包括以下指标：

- a) 老井数量：老井是CO₂主要泄漏途径之一，数量宜无或少。
- b) 老井状态：包括钻井时间、弃井或在产等。
- c) 套管规格：宜从套管壁厚、钢级等套管规格评价套管质量。
- d) 井筒完整性：宜从固井质量、封堵层位、水泥塞长度等方面评价井筒完整性。

5.8 封存容量

评价封存容量包括以下指标：

- a) 孔隙体积：评价储层用来容纳 CO₂ 的最大理论体积。
- b) 封存容量：依据现有技术条件下封存系数计算的储层 CO₂ 封存量。

5.9 工程条件

评价工程条件包括以下指标：

- a) 碳源距离：封存场地距离陆上碳源入海处宜小于200公里。
- b) 海洋水深：封存场地水深宜小于100米。
- c) 基础设施条件：以可依托现有海上设备、电力、管道等为佳。
- d) 地质灾害易发性：尽可能避免选址在地震、滑坡、浊流、浅层气、水合物等海底地质灾害易发区。
- e) 限制区域：宜远离生态、渔业、军事、航道等限制区。

5.10 资料基础

评价资料基础包括以下指标：

- a) 周边油气田情况：在不干扰油气生产的前提下，距离油气田越近越好。
- b) 油气发现情况：有油气发现为佳，如无油气发现，须分析未成藏原因。
- c) 地震及测网密度：地震资料宜以三维地震资料为佳，测网密度宜小于1×1公里。
- d) 测试化验等资料：录井、测井、岩性实验、流体检测等资料越丰富，研究认识越可靠。

6 场地适宜性评价方法

6.1 评价方法应用条件

通过对现有标准与文献总结，推荐类比分析法、专家打分法与模糊综合评价法进行场地适宜性评价。

a) 类比分析法：适用于数据资料较少，且存在可参考的相同的或相似的现有工程的目标场地。该方法是工程分析常用的方法，也是定量结果较为准确的方法，要求时间长、工作量大。

b) 专家打分法：适用于存在诸多不确定因素、客观数据不足，采用其他方法难以进行定量分析的情形。依赖专家的经验 and 知识来进行评估，主观性强。评估结果受专家的选择、数量以及专业知识水平和认知程度影响。

c) 模糊综合评价法：主要用于解决模糊和难以量化的问题，是一种基于模糊数学和模糊关联矩阵的综合评价方法，可将定性分析转化为定量计算。某些情况下，模糊关系矩阵的确定有一定困难，对于指标类型、数量较多的盆地级以上的评价等级，可能需分类设计，过程会更加繁琐，因此更适于指标较少评价对象较为简单的场地评价。

6.2 类比分析法

类比分析法是通过类比分析国内外相似场地的评价方法评价流程，参考借鉴相应的经验，进行目标场地的适宜性评价，是一种量化结果较为准确的方法。采用此法时，需充分注意分析目标与类比对象之间的相似性。

主要类比指标包括：

- a) 地质条件相似性：包括圈闭类型、储层物性、盖层性质、断裂发育等指标；
- b) 设施建设相似性：包括老井状态、套管规格、井筒完整性、基础设施等指标；
- c) 工艺技术相似性：包括碳源距离、海水水深、灾害易发性、限制区域等指标。

6.3 专家打分法

专家打分法是通过向多位专家进行问卷调查将定性指标量化的过程，综合评判各专家对评价指标的经验性打分，得出最终评价结果。该方法具有简洁便利、直观性强、计算方法简单等优点。选择专家群体时，需考虑涉及CCUS专业领域的人才并选取合理数量的具有专业水平专家，以保证结果的准确性。

结合层次分析法，对指标分级赋值，具体步骤如下：

a) 一级指标权重赋值：通过问卷调查、研讨会等方式，组织专家基于经验认识对一级指标影响场地适宜性重要程度进行打分，确定圈闭条件、储层条件、盖层条件等的评价权重，权重之和为1，权重公式见公式（1）：

$$W^1 = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_i) \quad (1)$$

式中：

W^1 ——一级指标评价向量；

w_i ——第*i*个一级指标的权重。

b) 二级指标权重赋值：判断二级指标对上层一级指标重要程度，打分并确定圈闭类型、圈闭面积、高点埋深等二级指标权重，权重之和为1，权重见公式（2）：

$$W_i^2 = (w_1^2, w_2^2, w_3^2, \dots, w_j^2) \quad (2)$$

式中：

W_i^2 ——第*i*个一级指标下二级指标评价向量；

w_j^2 ——第*j*个二级评价指标的权重。

c) 计算二级指标实际权重：将各项二级指标权重与上层一级指标权重相乘，求得各二级指标实际权重，权重之和为1，权重见公式（3）：

$$W_i^{2'} = (w_1^{2'}, w_2^{2'}, w_3^{2'}, \dots, w_j^{2'}) \quad (3)$$

式中：

$W_i^{2'}$ ——第*i*个一级指标下二级指标评价向量；

$w_j^{2'}$ ——第*j*个二级评价指标的实际权重。

d) 综合评价得分：对所有指标的权重（每个指标因子对应的最终权重由前面多级权重逐级相乘得到）和得分进行逐层计算再累加即为评价场地的综合评价得分，可按（1，0.5，0）或（0.9，0.7，0.5，0.3，0.2，0.1）赋值打分。计算见公式（4）：

$$P = \sum_{j=1}^n p_j w_j^{2'} \quad (4)$$

式中：

P ——场地总得分；

p_j ——第 j 个二级评价指标的评价得分。

e) 确定评语集：获得综合评价得分后，对封存场地适宜性进行等级分级。常采用三等级（好、一般、差）和五等级法（好、较好、一般、较差、差）划分适宜性评价等级结果。

6.4 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学，应用模糊数学隶属度理论将定性评价转化为定量评价的综合评价方法，即对受多种因素制约的对象事物进行总体评价。通过模糊综合评判得到的结果为向量形式的综合评判集，即评语集在其论域上的子集，包含丰富的信息量。这一方法具有结果清晰，系统性强的特点，能有效解决指标判断的模糊性和不确定性问题，适合各种非确定性问题的解决。

模糊综合评价法的一般步骤包括：

a) 确定评判对象：目标场地 CO₂ 地质储存适宜性。

b) 确定因子集：

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (5)$$

式中：

f_n ——选取的第 n 个评价指标。

c) 确定评语集：即对评价对象所作的评语的集合：

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (6)$$

式中：

v_m ——评价级数；

如采取 5 等级评语集， $V = \{\text{好, 较好, 中等, 较差, 差}\}$ 。

d) 构造模糊关系矩阵：首先需确定各个因子对各个等级的隶属度。

对于数值越大适宜性等级越高的定量指标，采用升半梯形分布的隶属函数；

对于数值越小适宜性等级越高的定量指标，采用降半梯形分布的隶属函数；

对于定性指标则采用正态型分布的隶属函数。

根据选取的隶属函数有效刻画隶属度的分布，进而建立评价指标 F 与评价等级 V 间的模糊关系矩阵

$R = \{r_{ij}\}_{n \times m}$ ：

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

若评价指标为 20 个，等级数为 5，评判矩阵 $R = \{r_{ij}\}_{20 \times 5}$ 。

e) 确定权重集：采用专家打分法或层次分析法确定评价指标权重：

$$W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) \quad (8)$$

式中：

w_n ——第 w_n 个评价指标权重。

f) 确定模糊综合评价集：将所有指标的权重 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：

$$B = W \cdot R = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (9)$$

式中：

b_n ——CO₂ 封存适宜性对第 n 个评价指标适宜性程度的隶属度。

g) 确定适宜度：利用模糊综合评判向量 B 对评语集 V 中的元素数量化，如对评语集 $V = \{\text{好, 较好, 中等, 较差, 差}\}$ ，

中等，较差，差}中的元素数量化为 $V = \{9, 7, 5, 3, 1\}$ 。

h) 综合评价结果分析：计算 CO₂ 封存适宜性综合得分，得到最终评价结果：

$$P = \sum_{j=1}^n b_j p_j \quad (10)$$

式中：

P ——场地总得分；

p_j ——第 j 个二级评价指标的评价得分。

附录 A

(资料性)

常用海上 CO₂ 咸水层封存适宜性评价相关数据表表 A.1 给出了常用海上 CO₂ 咸水层封存适宜性评价推荐指标和范围。表A.1 常用海上CO₂咸水层封存适宜性评价相关数据表

评价指标		适宜性评价		
		差	中	好
圈闭条件	圈闭类型	其它	断背斜/断鼻	背斜
	圈闭面积 (km ²)	<20	20-50	>50
	高点埋深 (m)	其它	2000-3500	800-2000
	圈闭形态	3 个及以上高点	2 个高点	1 个高点
	圈闭可靠性	不可靠	较可靠	可靠
	地震历史记录 (Ms)	<9	7-9	<6
储层条件	储层埋深 (m)	800-1000	1000-1500	>1500
	储层厚度 (m)	<500	500-1000	>1000
	储层砂地比 (%)	<30	30-50	>50
	储层孔隙度 (%)	<10	15-20	>20
	储层渗透率 (mD)	<100	100-500	>500
	储层压力系数 (MPa/100m)	>1.1	1.0-1.1	<1.0
	地温梯度 (°C/km)	>30	20-30	<20
盖层条件	盖层岩性	砂质泥岩	泥岩	泥岩、灰岩
	盖层厚度 (m)	<300	300-700	>700
	盖层渗透率 (mD)	>1	0.01-1	<0.01
	盖层泥地比 (%)	<40	40-70	>70
	纵向分布特征	薄单层	薄互层	多套厚层
	盖层连续性	分散式	基本连续	区域性连续
断裂条件	断裂数量 (条)	>3	1-3	0 或发育边界断裂
	断穿盖层断裂数 (条)	>2	1-2	0
	断层封闭性	不封闭	具有一定封闭性	断层封闭
老井条件	老井数量 (口)	>1	1	无
	老井状态	年代早、弃井	弃井或在产	弃井时间短
	套管规格	易受腐蚀	具有一定防腐能力	抗腐能力强
	井筒完整性	无封堵性	具有封堵性	封堵性好
封存容量	孔隙体积 (m ³)	-	-	-
	封存容量 (t)	<5 倍封存需求	5-10 倍封存需求	>10 倍封存需求
工程条件	碳源距离 (km)	>250	150-250	<150
	海洋水深 (m)	>150	100-150	<100
	基础设施条件	无依托基础设施	具有部分基础设施	具有完善基础设施
	地质灾害易发性	存在水合物、滑坡、浅	存在复杂洋流等	无地质灾害
	限制区域	在限制区内	限制区可调整	不在限制区
资料基础	周边油气田情况	远离	临近	有
	油气发现情况	顶部储层无显示	顶部储层有油气显示	顶部储层有油气发现
	地震及测网密度 (km×km)	测网密度>1×1	测网密度<1×1	3D 地震
	测试化验等资料	无	储层段有部分	储层、盖层段均有

参 考 文 献

- [1] Liu, Dongyue. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Ecological Environment Damage Compensation System and Management Based on Improved Association Rule Algorithm[J]. Mobile Information Systems, 2021, 2021, (1)。
- [2] 李宸瑶. 基于土地适宜性评价的城市湿地公园规划设计研究——以柳梢堰湿地公园为例[D]. 西北农林科技大学, 2021.
- [3] 赵赫. 典型高校阶梯教室人与环境适宜性的研究与评价[D]. 沈阳建筑大学, 2022.
- [4] 石贝凝, 向中林. 河南省煤矿城市地下空间开发适宜性评价[J]. 矿业科学学报, 2023, 8, (5): 714–724.
- [5] 杨国强, 苏小四, 杜尚海等. 松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价[J]. 地球学报, 2011, 32, (5): 570–580.
- [6] 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.
- [7] 赵青. 基于AHP-模糊综合评价法的露天矿生态环境质量评价[D]. 辽宁工程技术大学, 2009.
- [8] 许晓艺, 李琦, 刘桂臻等. 基于多准则决策的 CO₂ 地质封存场地适宜性评价方法[J]. 第四纪研究, 2023, 43, (2): 551–559.
-