

低渗致密油田二氧化碳地质封存 安全评价规范

Safety evaluation specification of carbon dioxide geological storage in low permeability tight oil field

2024 - 12 - 26 发布

2025 - 01 - 26 实施

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 基本要求	2
5 评价内容	2
6 安全评价结果	5
附录 A （资料性） 封存场地适宜性评价指标体系	8
附录 B （资料性） 安全评价指标记录表	11

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及某些专利。本文件的发布单位不承担专利的识别责任。

本文件由陕西省国资委提出并归口。

本文件起草单位：陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院、西安交通大学、陕西延安石油天然气有限公司。

本文件主要起草人：王香增、魏登峰、杨红、梁全胜、刘瑛、李超跃、杨肖虎、张志升、阳兴华、刘芳娜、杨永钊、马振鹏、姚振杰、董小刚、沈振振、刘晶静、李新林、刘凯、李剑、梁凯强、杨康。

本文件由陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院负责解释。

本文件首次发布。

联系信息如下：

单位：陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院

电话：029-87308162

地址：陕西省西安市雁塔区唐延路61号

邮编：710065

低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价规范

1 范围

本文件规定了低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价基本要求、评价内容和安全评价结果的要求。本文件适用于低渗致密油田二氧化碳地质封存的安全评价。

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 3838 地表水环境质量标准
- GB/T 14848 地下水质量标准
- GB/T 40543 石油天然气工业 高含CO₂环境用套管、油管及井下工具的材料选择
- HJ/T 164 地下水环境监测技术规范
- SY/T 0529 油田气中C₁~C₁₂, N₂, CO₂组分分析 关联归一气相色谱法
- SY/T 5163 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法
- SY/T 5329 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法
- SY/T 5346 岩石毛管压力曲线的测定
- SY/T 5523 油田水分析方法
- SY/T 5748 岩石中气体突破压力测定
- SY/T 5843 气水相对渗透率测定
- SY/T 6102 油田开发监测及资料录取规范
- SY/T 6490 岩样核磁共振参数实验室测量规范
- SY/T 6942 石油天然气盖层评价方法
- SY/T 7370 地下储气库注采管柱选用与设计推荐做法
- SY/T 7633 储气库井套管柱安全评价方法

3 术语和定义

SY/T 6942界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

地质封存 geological storage

将二氧化碳封存于地下地质构造中，实现其与大气长期隔绝的过程。

3.2

盖层 cap rock

位于储集层之上能够封隔储集层使其中的油气免于逸散的岩层。

[来源: SY/T 6942-2013, 3.1]

3.3

监测 monitoring

持续或重复检查、监督、观察、测量或确定系统的状态,以识别基线的变化或预期性能水平的差异。

4 基本要求

- 4.1 储层注入性良好, 具有较大的封存空间。
- 4.2 盖层具有良好的封闭性, 能抑制二氧化碳向上泄漏。
- 4.3 井筒材质与强度符合要求, 满足二氧化碳注入与封存的安全要求。
- 4.4 针对不同潜在的泄漏风险点制定合理的监测体系, 及时有效地监测二氧化碳的泄漏情况。
- 4.5 应科学准确的选取地球物理、油藏地质、油田开发、水文和环境数据, 采用合理的评价方法。
- 4.6 评价结果应具有可重复性与可验证性, 确保评价结果客观准确。

5 评价内容

5.1 场地筛选

5.1.1 评价指标选取

根据地质条件稳定性、二氧化碳封存安全性、二氧化碳注入性、封存潜力、经济性与社会条件因素, 场地筛选指标包括地质特征、储盖特征、地温特征、社会经济特征、封存潜力5个方面, 具体分为指标层、指标亚层、指标组成三级, 见附录A.1。

5.1.2 权重计算方法

采用层次分析法确定各评价指标的权重与打分值, 其中涉及打分标准见附录A.2~A.6。

5.1.3 适宜性评价方法

5.1.3.1 指标亚层评价指标打分值的计算见公式(1)。

$$P_j = \sum_{i=1}^n P_i A_i \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- P_i — 指标组成第 i 个评价指标的打分值;
- n — 指标组成的指标总数;
- P_j — 指标亚层第 j 个评价指标的打分值;
- A_i — 指标组成第 i 个评价指标的权重值。

5.1.3.2 指标层评价指标打分值的计算见公式(2)。

$$P_k = \sum_{j=1}^m P_j A_j \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- P_k — 指标层第 k 个评价指标的打分值；
- P_j — 指标亚层第 j 个评价指标的打分值；
- m — 指标亚层的指标总数；
- A_j — 指标亚层第 j 个评价指标的权重值。

5.1.3.3 二氧化碳地质封存适宜性综合得分值的计算见公式（3）。

$$P = \sum_{k=1}^s P_k A_k \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- P — 评价单元的二氧化碳地质封存适宜性综合得分值；
- P_k — 指标层第 k 个评价指标的打分值；
- s — 指标层的指标总数；
- A_k — 指标层第 k 个评价指标的权重值。

5.1.4 筛选结果判定

根据5.1.3中适宜性综合得分值，对筛选结果进行判定。

5.2 盖层封闭性

5.2.1 宏观封闭特征

描述宏观封闭特征包括：

- a) 利用测井资料或三维地震确定区域盖层、直接盖层以及储层内部的隔夹层，描述盖层构造-沉积环境、岩性组合、均质性、连续性、断裂与裂缝发育情况、厚度与埋深；
- b) 绘制盖层平面分布图，描述盖层平面分布特征。

5.2.2 微观封闭特征

5.2.2.1 评价参数

微观封闭特征评价参数包括但不限于：

- a) 描述盖层粘土矿物组成、孔喉特征情况；
- b) 测定水岩反应前后盖层岩心的渗透率、排替压力；
- c) 测定水岩反应前后盖层岩石的塑性指数。

5.2.2.2 测定方法

岩石粘土矿物组成测定按照SY/T 5163的规定执行。孔喉特征测定按照SY/T 5346与SY/T 6490的规定执行。渗透率测定按照SY/T 5843的规定执行。排替压力测定按照SY/T 5748的规定执行。塑性指数测定按照SY/T 6942的规定执行。

5.2.3 盖层区域封闭特征

绘制区域盖层排替压力平面分布图。

5.3 井筒要求

5.3.1 注采井

5.3.1.1 新钻井钻完井

新钻井选材要求包括：

- a) 套管头选用耐二氧化碳腐蚀材质的标准气密封套管头；
- b) 完井套管选用气密封套管，油层顶界至油层上 50 m 套管选用耐二氧化碳腐蚀的材质，固井选用耐二氧化碳腐蚀水泥；
- c) 油管、油管悬挂器、短节、封隔器、阀门及其他配件选材应符合 GB/T 40543 的规定。

5.3.1.2 老井选井

老井选井要求包括：

- a) 注水时检测固井质量，水泥环无微裂缝，且油层以上水泥胶结好且分布连续的段大于 150 m；
- b) 套变或落物鱼顶位置在水泥返高之下 200 m，套变位置以上井筒无漏、无穿孔、井况良好，修井前注水正常；
- c) 套管壁厚磨损小于 30 %。

5.3.2 注采井安全评价

5.3.2.1 套管

套管抗内压强度、抗挤强度、轴向应力下等效屈服强度、内外载荷按照SY/T 7633的规定执行。

5.3.2.2 水泥环

计算水泥环的剪切应力、环向应力、剪切安全系数、径向开裂安全系数，安全系数大于1.25。

5.3.2.3 油管

油管内压力、外压力、轴向力、有效力、三轴应力、强度设计按照SY/T 7370的规定执行。

5.4 安全监测

5.4.1 地下

5.4.1.1 储层

储层监测内容包括：

- a) 监测指标为储层温度、压力、二氧化碳运移范围；
- b) 监测方法采用光纤、试井、气相示踪、地面地震、垂直地震剖面（VSP）等。

5.4.1.2 盖层

盖层监测内容包括：

- a) 监测指标为盖层微裂隙等产生过程中出现的岩石破裂事件；
- b) 监测方法包括地面地震、微地震、垂直地震剖面（VSP）、光纤。

5.4.1.3 上覆地层

上覆地层监测内容包括：

- a) 监测指标包括地下水 pH 值、电导率、总矿化度（TDS）、总有机碳（TOC）、总无机碳（TIC）、主要离子组成；
- b) 取样和检测方法按照 HJ/T 164 规定方法执行。

5.4.1.4 井筒

井筒监测内容包括：

- a) 监测对象包括油管、套管、水泥环、产出流体；
- b) 监测指标包括注入压力、注入量（视吸水指数、视吸气指数）、采油井井口二氧化碳体积分数、采出水铁离子浓度、腐蚀速率、水泥环密度；
- c) 注入压力与注入量监测按照SY/T 6102的规定执行。二氧化碳体积分数测定按照SY/T 0529的规定执行。铁离子浓度测定按照SY/T 5523的规定执行。腐蚀速率测定按照SY/T 7370的规定执行。水泥环密度采用声幅测井。

5.4.2 地面

5.4.2.1 土壤

土壤监测内容包括：

- a) 监测对象为地表土壤以下 0.2 m、0.5 m、1.2 m 处的土壤气；
- b) 监测指标包括二氧化碳的体积分数以及 $\delta^{13}\text{C}$ ；
- c) 二氧化碳体积分数测定按照 SY/T 0529 的规定执行， ^{13}C 值采用碳同位素仪检测， $\delta^{13}\text{C}$ 的计算见公式（4），判断二氧化碳是否泄漏。

$$\delta^{13}\text{C}=[(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_i / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_j - 1] \times 1000 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

i — 第 i 个样品；

j — 标准样品，一般为美国南卡罗莱纳州白奎系皮狄组地层中的美洲拟箭石 (PDB)，定义其 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0.01124$ 。

5.4.2.2 地表水

地表水监测内容包括：

- a) 监测指标包括 pH 值、电导率、总矿化度 (TDS)、总有机碳 (TOC)、总无机碳 (TIC)、主要离子组成；
- b) 监测指标测定按照 GB/T 3838 的规定执行。

5.4.3 地上

地上监测内容包括：

- a) 监测对象为地面上 0.5 m 处大气中二氧化碳；
- b) 监测指标包括二氧化碳的体积分数以及 $\delta^{13}\text{C}$ ；
- c) 二氧化碳含量测定按照 SY/T 0529 的规定执行， ^{13}C 值采用碳同位素仪检测， $\delta^{13}\text{C}$ 的计算见公式（4），判断二氧化碳是否泄漏。

5.5 评价指标记录

见附录B。

6 安全评价结果

6.1 指标选取

选取二氧化碳垂直运移深度、井筒腐蚀速率、地层水pH值与Ca²⁺质量浓度、土壤气δ¹³C值、大气二氧化碳体积分数6个评价指标，建立二氧化碳封存安全评价体系。

6.2 等级划分

二氧化碳封存安全评价体系对应指标的安全等级按照SY/T 5329和GB/T 14848的规定执行，见表1。

表1 二氧化碳封存安全评价体系

安全等级	评价指标						安全指数
	盖层	井筒	上覆地层		土壤气	大气	
	二氧化碳垂直运移深度/m	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	pH	Ca ²⁺ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	δ ¹³ C/‰	二氧化碳体积分数/%	
I	A ₁ -A ₀	B ₁ -B ₀	C ₁ -C ₀	D ₁ -D ₀	E ₁ -E ₀	F ₁ -F ₀	0.7980~1
II	A ₂ -A ₁	B ₂ -B ₁	C ₂ -C ₁	D ₂ -D ₁	E ₂ -E ₁	F ₂ -F ₁	0.6974~0.7980
III	A ₃ -A ₂	B ₃ -B ₂	C ₃ -C ₂	D ₃ -D ₂	E ₃ -E ₂	F ₃ -F ₂	0.5536~0.6974
IV	A ₄ -A ₃	B ₄ -B ₃	C ₄ -C ₃	D ₄ -D ₃	E ₄ -E ₃	F ₄ -F ₃	0.0894~0.5536
V	A ₅ -A ₄	B ₅ -B ₄	C ₅ -C ₄	D ₅ -D ₄	E ₅ -E ₄	F ₅ -F ₄	0~0.0894

注1: A_i 为划分二氧化碳垂直运移深度等级的数据节点;
 注2: B_i 为划分井筒腐蚀速率等级的数据节点;
 注3: C_i 为划分上覆地层中水 pH 值等级的数据节点;
 注4: D_i 为划分上覆地层中水 Ca²⁺质量浓度等级的数据节点;
 注5: E_i 为划分土壤气δ¹³C 等级的数据节点;
 注6: F_i 为划分大气二氧化碳体积分数等级的数据节点 (i=0, 1, 2, 3, 4, 5)。

6.3 安全等级评价方法

6.3.1 表1中二氧化碳垂直运移深度和 pH 利用公式 (5) 进行数据标准化处理。

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{j,\min}) / (X_{j,\max} - X_{j,\min}) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- X'_{ij} — 第 i 年和第 j 指标监测数据标准化处理后的数值;
- X_{ij} — 第 i 年和第 j 指标的监测数据;
- X_{j,\max} — 第指标 j 监测数据的最大值;
- X_{j,\min} — 第指标 j 监测数据的最小值。

6.3.2 表1中腐蚀速率、Ca²⁺浓度、δ¹³C 和 CO₂ 浓度利用公式 (6) 进行数据标准化处理。

$$X'_{ij} = (X_{j,\max} - X_{ij}) / (X_{j,\max} - X_{j,\min}) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- X'_{ij} — 第 i 年和第 j 指标监测数据标准化处理后的数值;
- X_{ij} — 第 i 年和第 j 指标的监测数据;
- X_{j,\max} — 第 j 指标监测数据的最大值;
- X_{j,\min} — 第 j 指标监测数据的最小值。

6.3.3 安全指数的计算见公式 (7)。

$$W_{ij} = \sum X'_{ij} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

W_{ij} — 安全指数。

6.4 评价结果判定

根据6.3中的计算结果，确定二氧化碳封存安全等级。

附 录 A
(资料性)
封存场地适宜性评价指标体系

表 A.1 场地筛选评价指标体系及权重

指标层	权重	指标亚层	权重	指标组成	权重
储盖特征	0.4513	储层特征	0.4545	渗透率	0.2223
				储层厚度	0.2222
				孔隙度	0.2222
				储层深度	0.2222
		盖层特征	0.4545	岩性	0.1111
				岩性	0.3333
				分布连续性	0.3333
				单层厚度	0.1667
		累计厚度	0.1667		
		储盖组合	0.091	-	-
封存潜力	0.2986	一级构造单元封存潜力	0.5	-	-
		一级构造单元单位面积封存潜力	0.5	-	-
地质特征	0.1518	地壳稳定性	0.8182	断裂封闭性	0.5246
				地震	0.239
				断裂特征	0.1434
				火山	0.093
		一级构造单元面积	0.0909	-	-
一级构造单元沉积深度	0.0909	-	-		
社会经济特征	0.0668	资源潜力	0.5	-	-
		距碳源的距离	0.25	-	-
		勘探程度	0.25	-	-
地温特征	0.0315	地温梯度	0.5	-	-
		地热流值	0.5	-	-

表 A.2 层次分析法打分标准

重要性尺度	含义
1	表示两个因素相比，具有同样的重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2、4、6、8	表示两个因素相比，前者比后者的重要性介于上述两个相邻等级之间

表 A.3 场地筛选适宜性评价指标体系

指标评价层	评价指标	适宜	较适宜	一般	较不适宜	不适宜
地质特征	一级构造单元面积 S (km ²)	>10000	5000<S≤10000	500<S≤5000	100<S≤500	<100
	一级构造单元沉积深度 H (m)	>3500	2500<H≤3500	2500<H≤1500	1500<H≤800	<800
储盖组合条件	具有区域性盖层，且独立盖层为主	具有区域性盖层，自储盖组合为主	局部盖层，独立盖层为主	局部盖层，自储盖组合为主	无合适储盖层组合	不适宜
地温特征	地温梯度 G (°C/100 m)	<2.0	2.0<G≤3.0	3.0<G≤4.0	4.0<G≤5.0	>5
	地热流值 q (mW·m ⁻²)	<54.5	54.5<q≤65	65<q≤75	75<q≤85	>85
社会经济条件	距碳源的距离	近	较近	一般	较远	远
	勘探程度	开发中	勘探程度高	勘探程度一般	勘探程度低	未勘探过
	资源潜力 (油气、煤规模)	大	较大	一般	较小	小
封存潜力	一级构造单元封存潜力 M (10 ⁸ t)	>50	25<M≤50	0.5<M≤25	0.02<M≤0.5	<0.02
	一级构造单元单位面积封存潜力 m (10 ⁴ t)	>20	10<m≤20	5<m≤10	1<m≤5	<1

表 A.4 场地筛选地壳稳定性评价指标体系

指标评价层	评价指标	适宜	较适宜	一般	较不适宜	不适宜
地壳稳定性	断裂特征	有限的断层和裂缝，大的泥岩	有限的断层，有限的裂缝	中等断层，中等裂缝	较大断层，较大裂缝	大断层，大裂缝
	断裂封闭性	好	较好	中等	较差	差
	地震	极少发生距离远	少有发生距离较远	有发生距离中等	较多发生距离较近	多发生距离近
	火山	极少发生距离远	少有发生距离较远	有发生距离中等	较多发生距离较近	多发生距离近

表 A.5 场地筛选储层评价指标体系

	评价指标	适宜	较适宜	一般	较不适宜	不适宜
	储层	岩性	碎屑岩	碎屑岩、碳酸盐混合	碳酸盐	岩浆岩、变质岩、盐丘等特殊储层
储层深度 H (m)		1500≤H≤2000	2000<H≤2500	2500<H≤3000	3000<H≤3500	>3500
			1200≤H<1500	1000≤H<1200		800≤H<1000
储层厚度 (m)		≥80	60~80	30~60	10~30	<10
孔隙度 (%)		10≤φ	5≤φ<10	1≤φ<5	0.1≤φ<1	<0.1
渗透率 K (×10 ⁻³ μm ²)		≥10	1≤K<10	0.1≤K<1	0.01≤K<0.1	<0.01

表 A.6 场地筛选盖层评价指标体系

	评价指标	适宜	较适宜	一般	较不适宜	不适宜
	盖层	岩性	膏岩、泥岩、钙质泥岩	含砂泥岩、含粉砂泥岩	粉砂质泥岩、砂质泥岩	泥质粉砂岩、泥质砂岩
分布连续性		连续, 稳定	较连续, 较稳定	中等, 较稳定	连续性较差, 较不稳定	连续性差, 不稳定
单层厚度 h (m)		≥20	10≤h<20	5≤h<10	2.5≤h<5	<2.5
累计厚度 h (m)		≥300	150≤h<300	100≤h<150	50≤h<100	<50

附 录 B
(资料性)
安全评价指标记录表

表 B.1 盖层封闭性评价指标记录表

深度/ (m)	层段	渗透率/ ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	黏土含量/ (%)	孔喉半径中值/ (μm)	排替压力/ (MPa)	塑性指数	其他计算参数

注：其他计算参数见5.2.2。

表 B.2 套管/油管/水泥环安全评价指标记录表

深度 / (m)	内压力/ (MPa)	外压力/ (MPa)	轴向力/ (MPa)	三轴应力/ (MPa)	其他计算参数

注：其他计算参数见5.3.2。

表 B.3 地下监测指标记录表

日期	深度 (m)	层位	腐蚀速率/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	地下水 pH	二氧化碳垂直运移深度/ (m)	注入压力/ (MPa)	其他计算参数

注：其他计算参数见 5.4.1。

表 B.4 土壤气监测指标记录表

日期	监测点	地表以下 0.2 m		地表以下 0.5 m		地表以下 1.2 m	
		CO ₂ 体积分数/ (%)	δ ¹³ C/ (‰)	CO ₂ 体积分数/ (%)	δ ¹³ C/ (‰)	CO ₂ 体积分数/ (%)	δ ¹³ C/ (‰)

表 B.5 地表水监测指标记录表

日期	监测点	pH	电导率/ (S/m)	总矿化度/ (g/L)	总有机碳/ (mg/L)	总无机碳/ (mg/L)	主要离子组成	其他计算参数

注：其他计算参数见 5.4.2.2。

表 B.6 地上监测指标记录表

日期	监测点	CO ₂ 体积分数/ (%)	δ ¹³ C/ (‰)