ICS 点击此处添加ICS号

点击此处添加中国标准文献分类号

|  |
| --- |
|  |

DB

陕西省地方标准

DB XX/ XXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

低渗致密油田二氧化碳地质封存

安全评价规范

Safety evaluation criterion of carbon dioxide geological sequestration in Ordos Basin

|  |
| --- |
|  |
| （本稿完成日期：2023年10月30日） |

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

陕西省市场监督管理局   发布

目 次

[前言 I](#_Toc156549968)

[1 范围 1](#_Toc156549970)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc156549971)

[3 术语和定义 1](#_Toc156549972)

[4 场地筛选 2](#_Toc156549985)

[5 盖层封闭性 4](#_Toc156549989)

[6 井筒完整性 4](#_Toc156549993)

[7 安全监测 4](#_Toc156549996)

[8 安全评价 6](#_Toc156550000)

前  言

本标准按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本标准由陕西延长石油（集团）有限责任公司提出。

本标准由陕西省能源局归口。

本标准起草单位：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。

本标准主要起草人：王香增、魏登峰、杨红、刘瑛、梁全胜、李超跃、阳兴华、赵永攀、沈振振、刘芳娜、李新林、梁凯强、姚振杰、刘凯、马振鹏、李剑、杨康、陈芳萍

本标准由陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院负责解释。

本标准首次发布。

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

本标准包含了低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价的术语和定义、CO2地质封存场地筛选、盖层封闭性评价、井筒完整性评价、安全监测及评价等内容。

本标准适用于低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价技术实施。

1. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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。

HJ 493 水质采样 样品的保存和管理技术规定

HJ 494 水质 采样技术指导

HJ 495 水质 采样方案设计技术规定

HJ/T 164 地下水环境监测技术规范

Q/YCYJ J003 二氧化碳驱油封存环境与井筒监测规范

Q/YCYJ J055 低渗油藏CO2驱油与封存一体化技术规范

Q/YCYJJ036 低渗透油藏液态CO2驱油与封存注入操作规范

Q/SY 01006 二氧化碳驱注气井保持井筒完整性推荐作法

SY/T 5523 油田水分析方法

SY/T 5273 油田采出水用缓蚀剂性能评价方法

SY/T 5346 岩石毛管压力曲线的测定

SY/T 5/843 气水相对渗透率测定

SY/T6940 岩样核磁共振参数实验室测定规范

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

T/CSES 71 二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范

GB/T50266 工程岩体试验方法标准

1. 术语和定义

低渗致密油田 low permeability tight oil field

储层渗透率低于50×10-3μm2的油藏。



地质封存 geological storage

通过工程技术手段将捕集的二氧化碳直接注入至地下深部咸水层、枯竭油气藏等地质构造中，实现其与大气长期隔绝的过程。

[来源：T/CSES 71]



盖层封闭性 caprock sealing property

抑制储层流体向其上方的非渗透性岩层运移，并使其免于向上散逸的能力。



井筒完整性 wellbore integrity

井口、套管、水泥环等井筒结构在设计期限内完整，地层流体难以沿井筒发生泄漏。



安全监测 safety monitoring

通过水环境监测、二氧化碳通量与浓度监测、地震监测等技术，监测储层、盖层、井筒中二氧化碳的运移，监测地表及大气中二氧化碳浓度、通量的变化，确保在井口和地下发生泄漏时及时予以识别，保障地下二氧化碳的封存安全。

[来源：T/CSES 71]



缓冲层 buffer layer

CO2存储层到地表之间的地质层位。。

1. 场地筛选
   1. 评价指标及权重

根据地质条件稳定性、CO2驱油与封存安全性、CO2注入性、封存潜力、经济性与社会条件因素，场地筛选指标应包括地质特征、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。采用层次分析法确定评价指标体系中各评价指标权重值，具体计算结果见表1，指标层、指标亚层和指标组成的打分值参考附录A。

表1 二氧化碳驱油与封存评价指标体系及其权重

| 指标层 | 权重 | 指标亚层 | 权重 | 指标组成 | 权重 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 地质特征 | 0.1518 | 一级构造单元面积 | 0.0909 | - | - |
| 地壳稳定性 | 0.8182 | 断裂特征 | 0.1434 |
| 断裂封闭性 | 0.5246 |
| 地震 | 0.2390 |
| 火山 | 0.0930 |
| 一级构造单元沉积深度 | 0.0909 | - | - |
| 储盖特征 | 0.4513 | 储层特征 | 0.4545 | 岩性 | 0.1111 |
| 储层深度 | 0.2222 |
| 储层厚度 | 0.2222 |
| 孔隙度 | 0.2222 |
| 渗透率 | 0.2223 |
| 储盖组合 | 0.0910 | - | - |
| 盖层特征 | 0.4545 | 岩性 | 0.3333 |
| 分布连续性 | 0.3333 |
| 单层厚度 | 0.1667 |
| 累计厚度 | 0.1667 |
| 地温特征 | 0.0315 | 地温梯度 | 0.5000 | - | - |
| 地热流值 | 0.5000 | - | - |
| 社会经济特征 | 0.0668 | 距碳源的距离 | 0.2500 | - | - |
| 勘探程度 | 0.2500 | - | - |
| 资源潜力 | 0.5000 | - | - |
| 封存潜力 | 0.2986 | 一级构造单元封存潜力 | 0.5000 | - | - |
| 一级构造单元单位面积封存潜力 | 0.5000 | - | - |

* 1. 评价指标计算方法

利用式（1）（2）（3）即可计算出CO2地质封存适宜性综合得分。

 （1）

 （2）

 （3）

式中：

*P* — 评价单元的CO2地质封存适宜性综合得分值；

*Pi* — 指标组成第*i*个评价指标的打分值；

*Pj* — 指标亚层第*j*个评价指标的打分值；

*Pk* — 指标层第*k*个评价指标的打分值；

*n* — 指标组成的指标总数；

*m* — 指标亚层的指标总数；

*s* — 指标层的指标总数；

*Ai* — 指标组成第*i*个评价指标的权重值；

*Aj* — 指标亚层第*j*个评价指标的权重值；

*Ak* — 指标层第*k*个评价指标的权重值。

* 1. 筛选结果判定

采用公式（1）（2）（3）对各个区域的CO2地质封存适宜性进行计算，计算得到的适宜性综合得分值越高，表示区域更适合开展CO2地质封存。

1. 盖层封闭性
   1. 盖层宏观封闭特征

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，描述盖层分布及厚度。

b）绘制盖层平面分布图，描述盖层平面分布特征。

* 1. 盖层微观封闭特征

a）描述盖层岩性、粘土矿物含量、孔喉特征。

b）测定盖层岩心的渗透率、排替压力。

c）测定盖层岩石的抗拉强度、抗压强度、弹性模量、泊松比。

* 1. 盖层区域封闭特征

计算区域盖层的排替压力，绘制排替压力平面分布图。

1. 井筒完整性
   1. 注入井要求
      1. 新钻井钻完井要求

按照标准Q/SY 01006—2016 第5章执行。

* + 1. 老井选井要求

按照标准Q/SY 01006—2016 第 6 章执行。

* 1. 注采井安全评价
     1. 套管安全评估

计算套管三轴安全系数，安全系数应大于1.25。

* + 1. 水泥环安全评估

计算水泥的剪切安全系数和径向开裂安全系数，安全系数均应大于1.25。

* + 1. 油管安全评估

计算油管三轴安全系数，安全系数应大于1.25。

1. 安全监测
   1. 地下监测
      1. 储层监测

a）监测对象为储层中流体的温度和压力。

b）监测对象为储层中的CO2。

c）监测方法采用气相示踪法、垂直时移地震（VSP）法。

d）气相示踪主要监测采油井产出示踪剂浓度，VSP主要监测地震波振幅变化。

* + 1. 盖层监测

a）监测对象为CO2运移过程中盖层产生的岩石破裂事件。

b）监测手段包括微地震、U型管取样、光纤。

* + 1. 缓冲层监测

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）、主要离子组成以及δ13C稳定同位素。

b）取样和检测方法参照HJ/T 164-2004。

* + 1. 井筒监测

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、采油井井口CO2体积分数、采出水铁离子浓度、腐蚀速率、水泥环密度。

c）CO2含量测定方法分为现场快速检测和气相色谱仪检测，产出水测定按照SY/T 5523-2006规定方法执行，腐蚀速率测定按照SY/T 5273-2000规定方法执行。

* 1. 地面监测
     1. 土壤监测

a）监测对象为地表土壤以下0.2m、0.5m、1.2m处的土壤气。

b）监测指标包括CO2的体积分数以及13C值。

c）CO2体积分数采用气相色谱分析仪检测，通过式（4）计算δ13C，判断CO2是否泄露。

δ13C=[(13C/ 12C)样品/(13C/ 12C)标准-1] ×1000 （4）

式中：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δ13C =0. 01124。

* + 1. 地表水监测

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）取样和检测方法参照标准HJ 493-2009、HJ 494-2009、HJ 495-2009、GB3838-2002。

* 1. 地上监测

a）监测对象为地面以上0.5m处大气中CO2。

b）监测指标包括CO2的体积分数以及13C值。

c）CO2体积分数检测采用气相色谱分析仪检测，通过式（4）计算δ13C，判断CO2是否泄露。

1. 安全评价

安全评价体系包括盖层中CO2垂直运移深度、井筒腐蚀速率、缓冲层中水pH值、Ca2+浓度、土壤气δ13C和大气CO2体积分数6个指标，通过确定各指标的权重，利用各个指标和权重计算场地安全指数并确定场地安全等级，参考附录B。

附 录 A

（资料性）

专家对指标层、指标亚层和指标组成的打分值参考表2~表5，其中适宜、较适宜、一般、较不适宜和不适宜对应的打分值分别为9、7、5、3、1，且打分值2、4、6、8表示1、3、5、7、9相邻判断的中间值。

表2 CO2地质封存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（km2） | ＞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（℃/100m） | ＜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（108t） | ＞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（104t） | >20 | 10＜m≤20 | 5＜m≤10 | 1＜m≤5 | <1 |

表3 CO2地质封存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4 CO2地质封存储层评价指标体系

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 储层 | 评价指标 | 适宜 | 较适宜 | 一般 | 较不适宜 | 不适宜 |
| 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 | 无 |
| 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 | ＜800 |
| 储层厚度（m） | ≥80 | 60～80 | 30～60 | 10～30 | <10 |
| 孔隙度（%） | 10≤φ | 5≤φ10 | 1≤φ＜5 | 0.1≤φ＜1 | ＜0.1 |
| 渗透率K  （×10－3μm2） | ≥10 | 1≤K＜10 | 0.1≤K＜1 | 0.01≤K＜0.1 | ＜0.01 |

表5 CO2地质封存盖层评价指标体系

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 盖层 | 评价指标 | 适宜 | 较适宜 | 一般 | 较不适宜 | 不适宜 |
| 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 | 页岩、致密灰岩 |
| 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）

表6 CO2封存安全评价体系

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 安全等级 | 评 价 指 标 | | | | | | 安全指数 |
| 盖层 | 井筒 | 缓冲层 | | 土壤气 | 大气 |
| CO2垂直运移深度/m | 腐蚀速率/（mm·a-1） | pH值 | Ca2+质量浓度/（mg·L-1） | *δ*13C/‰ | CO2体积分数/% |
| Ⅰ | *A1-A0* | *B1-B0* | *C1-C0* | *D1-D0* | *E1-E0* | *F1-F0* | 0.7980~1 |
| Ⅱ | *A2-A1* | *B2-B1* | *C2-C1* | *D2-D1* | *E2-E1* | *F2-F1* | 0.6974~0.7980 |
| Ⅲ | *A3-A2* | *B3-B2* | *C3-C2* | *D3-D2* | *E3-E2* | *F3-F2* | 0.5536~0.6974 |
| Ⅳ | *A4-A3* | *B4-B3* | *C4-C3* | *D4-D3* | *E4-E3* | *F4-F3* | 0.0894~0.5536 |
| Ⅴ | *A5-A4* | *B5-B4* | *C5-C4* | *D5-D4* | *E5-E4* | *F5-F4* | 0~0.0894 |

表中： *Ai* 为划分CO2垂直运移深度等级的数据节点，*Bi* 为划分井筒腐蚀速率等级的数据节点，*Ci* 为划分缓冲层中水pH值等级的数据节点，*Di* 为划分缓冲层中水Ca2+质量浓度等级的数据节点，*Ei* 为划分土壤气*δ*13C等级的数据节点，*Fi* 为划分大气CO2体积分数等级的数据节点（i=0，1，2，3，4，5）。