陕西省地方标准

《低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价规范》编制说明

# 工作概况

1.1任务来源

本项地方标准是根据陕市监函[2023]410号文件《关于下达2023年度陕西省地方标准制修订项目计划的通知》。

1.2 协作单位

西安交通大学、陕西延安石油天然气有限公司。

1.3 任务背景

为应对全球气候变化，习近平总书记在国内外多个重要会议上反复强调我国力争CO2排放2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和。碳捕集、利用与封存（CCUS）作为一项为应对温室气体减排而发展起来的新兴技术，能够在实现CO2大规模减排中发挥重要作用，国际能源署（IEA）2020年的研究表明，在可持续发展情景下，CCUS技术对CO2累积减排量的贡献可达15%。CO2驱油与封存作为CCUS技术的重要组成和发展方向，具有经济和环保双重效益，被认为是当前经济和技术条件下CO2减排的理想选择。

延长石油所处的陕北地区石油煤炭资源共处一地，实施CCUS项目具有全流程一体化的独特优势。延长石油现有榆煤化、榆能化和延能化等多个煤化工企业，每年CO2排放量约2700万吨，减排压力非常大。同时，延长石油适合CO2驱油的石油储量有17亿吨，地下可封存CO2潜力达数十亿吨，而且盆地地质构造简单、没有大的断层，易实现CO2永久封存。此外，陕北地区水资源匮乏，通过CO2驱油可节约大量水资源。鄂尔多斯盆地油藏封存潜力的为19.1亿吨，咸水层封存潜力达3356亿吨，因此，延长石油开展CCUS项目及其在鄂尔多斯盆地推广的意义重大。

2007年开始，延长石油联合国内相关高校和科研院所，组成高水平“产、学、研”研发团队，先后承担国家科技支撑项目、国家高新技术研究发展计划（863计划）课题、国家重点研发计划项目，设立省和集团重大专项和重大试验攻关，经过10多年的持续攻关，取得一系列理论技术创新成果，二氧化碳驱油与封存关键技术获得突破。延长石油目前已建成靖边乔家洼、吴起油沟和白豹、杏子川化子坪4个示范区，注入能力达到15万吨/年，并正在新建26万吨/年CCUS示范工程，累计注入量超过25万吨，单井增产超过50%，取得了较好的经济社会效益。

在CO2驱油与封存过程中，由于地质条件本身的不确定性、井筒不完整以及油藏开发过程中的人为活动因素，注入的CO2依然具有一定的泄漏风险。因此，为保障CO2安全有效封存，需要在CO2驱油与封存试验前，进行CO2封存场地适宜性评价，确定CO2封存优势靶区，明确上覆盖层封闭性和注采井筒的完整性，针对性地开展相应的安全监测，以预防CO2发生泄漏对生态环境和社会安全产生重大影响。

自2015年以来，延长石油先后主导完成了4项企业标准以及1项地方标准的编写工作，内容主要涉及开发方案编制、CO2的注入操作、井筒监测等方面，但在CO2驱油与封存安全性评价方面的规范尚未建立，直接制约了延长石油CCUS技术的快速发展，亟需二氧化碳驱油与封存安全评价制定统一的、合理的、有效的技术规范。因此本标准的建立可以为延长石油500万吨CCUS规划落地实施和鄂尔多斯盆地开展大规模CCUS项目提供有效指导，同时也为其他区域开展CO2驱油与封存提供借鉴，对国内外同类型油田具有积极的技术示范作用。

1.4 主要工作过程

本标准是在参照相关标准规范基础上，结合延长石油CO2地质封存矿场经验及鄂尔多斯盆地地质特征而制订的，具体制定工作从2023年5月开始。编制过程如下：

第一阶段制定实施方案（2023年2月10日～2023年5月31日）

2023年5月10日陕西省质量技术监督局下达陕西省地方标准《低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价规范》编制任务后，陕西延长石油（集团）有限责任公司积极组织，成立标准编写领导小组和标准起草小组，明确标准编写任务。随后标准起草小组对相关国家、行业标准的修订更新等方面开展调研，收集了相关的国家标准、石油行业标准和有关技术应用及发展资料，结合室内实验及现场实际应用，经过讨论制定了标准编制的实施方案。

第二阶段完成工作组讨论稿（2023年6月1日～2023年9月15日）

2023年6月1日～2023年9月15日，根据调研情况制定工作路线和预期水平，完成了标准工作组讨论稿的编写。

第三阶段完成小范围征求意见稿（2023年9月16日～2023年10月30日）

2023年9月16日～2023年10月30日，根据单位内部评审会专家意见，完成了标准小范围征求意见稿的编写。

1.5 起草组组成成员及其所做的主要工作

本项目组由X名工作人员组成，共同实施完成本标准的编制工作，具体分工如下：

王香增：项目负责人，负责标准的立项，技术分析评价和标准编制工作。

魏登峰：负责标准技术路线。

杨 红：负责标准和编制说明的编写。

刘 瑛：负责标准中区块筛选部分的编写。

梁全胜：负责标准资料核准及标准框架结构。

李超跃：负责标准安全评价部分和编制说明的编写。

阳兴华：负责标准起草、意见汇总和修改工作。

赵永攀：负责井筒完整性评价部分的编写。

沈振振：负责标准现场数据分析。

刘芳娜：负责井筒完整性评价部分的编写。

李新林：负责标准中安全监测部分的编写。

梁凯强：负责标准的前期调研工作。

姚振杰：负责标准中区块筛选部分的编写。

刘 凯：负责井筒完整性评价部分的编写。

马振鹏：负责标准安全监测部分。

李 剑：负责标准中区块筛选部分的编写。

杨 康：负责标准安全监测部分。

陈芳萍：负责标准中区块筛选部分的编写。

# 二、标准编制原则

本标准根据《标准化工作导则》GB/T 1.1-2020编写规定进行编写，符合以下原则：

1、科学合理，技术先进，积极借鉴、采用国内外先进技术方法、标准；

2、目的明确，有利于促进技术进步，提高科研水平，提高现场实施效果；

3、经济适用，有利于合理利用油气田废水资源，提高经济效益；

4、安全可靠，可操作性强；

5、符合国家的政策，贯彻国家的法律法规。

# 三、标准编制的主要内容

本标准征求意见稿内容共8章，第1章规定了标准的适用范围；第2章为标准的规范性引用文件；第3章为术语和定义；第4章为封存目标区块筛选评价指标；第5章为场地盖层封闭性评价；第6章为井筒完整性评价；第7章为靶区二氧化碳运移安全监测；第8章为地质封存安全评价体系。

# 四、主要实验（或验证）情况分析

**1、确定标准主要内容的论据**

本标准参照了中华人民共和国国家标准和石油天然气行业标准，并结合CO2驱油与地质封存的实际特点以及低渗（陕北鄂尔多斯盆地）油藏具体地质条件，确定了本标准的主要内容。本标准制定过程中参照的主要标准见如下：

① HJ 493-2009 水质采样 样品的保存和管理技术规定

② HJ 494-2009 水质 采样技术指导

③ HJ 495-2009 水质 采样方案设计技术规定

④ HJ/T 164-2004 地下水安全监测技术规范

⑤ SY/T 5523-2006 油田水分析方法

⑥ SY/T 5273-2000 油田采出水用缓蚀剂性能评价方法

⑦ Q/YCYJ J003-2015 二氧化碳驱油封存环境与井筒监测规范

⑧ Q/YCYJ J055-2020 低渗油藏CO2驱油与封存一体化技术规范

⑨ Q/YCYJJ036-1027 低渗透油藏液态CO2驱油与封存注入操作规范

⑩ T/CSES 71—2022 二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范

**2、本标准包含的主要内容和涉及的实验方法**

①本标准包含的主要内容

本标准主要内容包括：场地筛选、盖层封闭性、井筒完整性、安全监测、安全评价。

②本标准涉及的实验方法

盖层密封性评价实验按照SY/T 5346－2005、SY/T 5/843－1997、SY/T6940－2014、SY/T 5163－2010、SY/T 5748－2013和GB/T50266－2013测定方法执行。

水的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：采用HJ 493-2009、HJ 494-2009、HJ 495-2009、GB3838-2002测定方法执行。

**3、层次分析法**

层次分析法(Analytic Hierarchy Process，简称AHP)是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。对评价指标体系中各评价指标权重的确定主要采用层次分析法，计算过程依次为：由专家对各层次指标进行打分，专家要求从事相关专业10年以上工作经验，职称要求高工及以上。打分标准具体见下表1，建立由各层次指标打分值构成的判断矩阵；对不同层次指标的判断矩阵求取权向量（权重）。

表1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 |

**4、盖层排驱压力计算方法**

以长4+5盖层为例，选取待评价区域的生产井，并测得其测井曲线，在测井曲线上读取长4+5盖层起始深度值x1及其厚度h。分段对测井曲线中的声波时差曲线进行拟合，得到分段后的各段拟合函数f1(x)、f2(x)、f3(x)…fn(x)及各段函数对应的深度差值Δh1、Δh2、Δh3…Δhn；通过以下公式计算各井的声波时差曲线对应的声波时差值$\overline{∆t}$：



其中，fi(x)表示声波时差曲线第i段声波时差曲线函数，Δhi表示对应声波时差函数fi(x)的深度差值。

将所读取的长4+5盖层位厚度值h和对应声波时差值代入如下公式，计算综合排驱压力值P，以P评价盖层封闭性能，P的值越大，表示该区域盖层封闭性能越好。



其中：

**5、井筒完整性**

以鄂尔多斯盆地某CO2注入井为例，对该井进行井筒完整性分析，内容包括油管、套管和水泥环三部分内容，通过计算安全系数分别绘制成井筒安全系数分布图，见图1、图2、图3。从图中看出安全系数均大于1.5，因此CO2注入井的井筒不存在破坏的风险，不会发生强度破坏。



图1油管三轴安全系数随井深变化曲线



图2 套管三轴安全系数随井深变化曲线



图3 水泥环安全系数分布图

**6、CO2浓度监测**

自试验区运行初期开始，就制订了定期现场跟踪、取样检测，分析化验的方法了解试验区大气、土壤气、套管气的CO2浓度变化，通过长期的现场跟踪分析，大气中浓度保持420-440ppm，均处于背景值范围内，通过多种监测手段，数据表明示范区目前各个范围内均未检测到CO2泄漏。

**7、安全评价**

将CO2封存安全评价体系划分为非常安全、安全、基本安全、不安全和很不安全5个等级，各等级对应指标的取值范围具体见表6。

表6 黄土塬地区特低渗油藏CO2封存安全评价体系

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 安全等级 | 盖层 | 井筒 | 缓冲层 | 土壤 | 大气 | 安全指数 |
| CO2垂直运移深度/m | 腐蚀速率/mm·a-1 | pH | Ca2+浓度/mg·L-1 | δ13C/‰ | CO2浓度/ppm |
| Ⅰ | 非常安全 | 1380~1500 | 0~0.025 | 6.5~8.5 | 0~150 | -25.6~-39.3 | 375~103 | 0.7980~1 |
| Ⅱ | 安全 | 1280~1380 | 0.025~0.076 | 6.5~8.5 | 150~300 | -25.6~-39.3 | 103~104 | 0.6974~0.7980 |
| Ⅲ | 基本安全 | 1030~1280 | 0.076~0.125 | 6.5~8.5 | 300~450 | -25.6~-39.3 | 104~4×104 | 0.5536~0.6974 |
| Ⅳ | 不安全 | 200~1030 | 0.125~0.254 | 5.5~6.5 | 450~650 | -15.0~-17.0 | 4×104~105 | 0.0894~0.5536 |
| Ⅴ | 很不安全 | 0~200 | ＞0.254 | ≤5.5 | ＞650 | -15.0~-17.0 | 105~106 | 0~0.0894 |

采用综合指数法确定目标体系的安全等级。通过对评价体系中各指标数值进行标准化处理，并确定各指标权重后，即可计算目标体系所处的安全等级。

各指标的权重采用层次分析法进行确定。其中，判断矩阵主要通过具有多年CCUS项目经验的专家打分来建立。经计算，CO2垂直运移深度、腐蚀速率、pH、Ca2+浓度、δ13C和CO2浓度的权重分别为：0.4418、0.2288、0.1309、0.1081、0.0566和0.0339。

黄土塬地区特低渗油藏长6储层CO2驱油与封存监测实践显示，CO2垂直运移深度为1500m、腐蚀速率为0.016mm/a、深层地下水pH值为6.87、浅层地下水Ca2+浓度为138.95mg/L、土壤气δ13C值为-25.6、大气CO2浓度为410ppm。计算得到目标区的安全指数为0.8595，参考表6得出黄土塬地区特低渗油藏安全等级为Ⅰ级。

**五、征求意见情况**

该标准送往陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院进行征求意见，并邀请相关专家进行会议评审，共收到14条有效意见，意见汇总及采纳情况见表7。

表7 意见汇总及采纳情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **意见章条及原标准内容** | **修改意见及依据** | **提出单位** | **意见处理** |
| **1** | 标准第三章第四条术语“井筒完整性 wellbore integrity，井筒完整性是综合运用技术、操作和组织管理的解决方案来降低油气井在全生命周期内地层流体不可控泄漏的风险。” | “3.4井筒完整性”术语表述不清晰。 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“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。” |
| **2** | 标准第三章添加缓冲层的术语。 | 标准中未添加关于缓冲层的表述。 | CCUS研究中心 | 全部采纳。修改为“缓冲层 buffer layer CO­2存储层到地表之间的地质层位。” |
| **3** | 标准第四章第一条“评价指标及权重”。 | 需解释体系中指标的选择依据，并将权重的赋值计算过程添加到附录中。 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“场地筛选应考虑地质特征、储盖特征、地温特征、社会经济特征、封存潜力5个方面。CO2驱油与封存评价指标可分为指标层、指标亚层、指标组成三级。” |
| **4** | 标准第五章第三条“盖层区域封闭特征”。 | 删除重复内容 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“计算区域盖层的排替压力，绘制排替压力平面分布图”。 |
| **5** | 标准第六章第一条 注入井要求 | 添加引用的标准，删除与参考标准中重复的内容 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“按照标准Q/SY 01006—2016 第5章执行。” |
| **6** | 标准第六章第二条注采井安全评价 | 内容顺序调整，并删除关于“三轴应力、米赛斯等效应力，结合油管许用应力”的表述。 | CCUS研究中心 | 全部采纳。修改为“6.2.1套管安全评估、6.2.2水泥环安全评估、6.2.3 油管安全评估。” |
| **7** | 标准第七章第一条第二节盖层监测 | 删除第一条的监测对象 | CCUS研究中心 | 全部采纳。修改为“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。” |
| **8** | 标准第七章第一条第三节地下水监测 | 名称换成“缓冲层监测”，删除第一条的监测对象；“CO2含量测定方法分为现场快速检测和气相色谱仪检测” | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“CO2含量测定方法分为现场快速检测和气相色谱仪检测”。 |
| **9** | 标准第七章第二条第一节土壤监测，“CO2浓度采用气相色谱分析仪检测，判断δ13C是否泄露。” | 表述错误 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改为“CO2体积分数检测采用气相色谱分析仪检测，通过计算δ13C判断CO2是否泄露。”添加δ13C的计算公式。 |
| **10** | 标准第七章第三条地上监测，“b) 监测指标包括CO2的体积分数以及δ13C值。c) CO2浓度检测采用气相色谱分析仪监测, 通过计算δ13C，判断CO2是否泄露。” | 表述错误 | CCUS研究中心 | 全部采纳。修改为“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。” |
| **11** | 标准第八章“深层地下水pH值、浅层地下水Ca2+浓度” | 表述错误 | CCUS研究中心 | 全部采纳。修改为“缓冲层中水pH值、Ca2+浓度”。 |
| **12** | 标准附录A“CO2封存安全评价体系” | 安全等级未固定，并指定对应等级的安全指数 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。修改后安全等级为5个，并给出其对应安全指数的范围。 |
| **13** | 2 规范引用文件 | 引用标准的排序符合规范 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。 |
| **14** | “7.1.1储层监测”增减储层流体温度、压力监测 | a）监测对象为储层中流体的温度和压力 | 采收率技术研究所 | 全部采纳。7.1.1增加a）监测对象为储层中流体的温度和压力 |
| **15** | 5.1中应表述为绘制盖层平面分布图”； | 表述错误 | CCUS研究中心 | 全部采纳。“5.1中编制盖层平面分布图”修改为绘制盖层平面分布图； |

# 六、产业化情况，推广运用论证和预期达到的经济效果情况

1、本标准编制填补了陕西省《低渗致密油田二氧化碳地质封存安全评价规范》的技术空白，对推进陕西省鄂尔多斯盆地二氧化碳驱油及地质封存标准化建设具有重要促进作用。

2、本标准具有公正性、合理性和科学性，预计可产生良好的社会效益和经济效益。

# 知识产权说明

无

# 八、采标情况

无

# 九、与现行相关法律法规、规章及现行有效标准的协调性

本标准与现行的国家相关法律、法规和强制性标准没有冲突。

# 十、重大分歧意见的处理经过和依据

根据编写组多次讨论和意见反馈后形成编写组讨论稿，在稿件的形成过程中，参与编制人员认识一致，不存在重大分歧意见。

# 十一、标准性质的建议说明（推荐性标准还是强制性标准）

本标准为首次制定，处于技术发展和完善阶段，建议为推荐性标准。

# 十二、贯彻标准的要求、措施和建议

1、加强宣传，做好宣传培训，使陕西省相关生产企业和科研机构掌握标准的各项技术要求，加强示范推广，使标准的应用真正落到实处。

2、对标准执行情况进行跟踪调查，及时发现标准执行中的问题，不断修改完善，提升标准水平，提高标准的科学性、合理性、协调性和可操作性。

# 十三、废止现行相关标准的建议

无。

# 十四、其他应予以说明的事项

无。