

团 体 标 准

T/CSES XXXX—2022

二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评估  
价规范

Leakage risk assessment specification for geological CO<sub>2</sub> utilization and  
storage projects

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施



## 目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 总则.....	3
4.1 概述.....	3
4.2 泄漏风险涵盖的范围.....	3
4.3 泄漏风险评价目标.....	3
4.4 泄漏风险评价总体流程.....	3
5 二氧化碳泄漏风险识别与环境本底值调查.....	3
5.1 二氧化碳泄漏风险源、驱动力、泄漏途径、泄漏影响范围和危害.....	3
5.2 二氧化碳泄漏风险判定指标.....	4
5.3 环境本底值调查.....	6
6 二氧化碳泄漏风险分析.....	7
6.1 总体要求.....	7
6.2 井筒基本信息指标风险打分表.....	7
6.3 断层条件指标风险打分表.....	8
6.4 二氧化碳注入信息风险打分表.....	9
6.5 封存地质体基本信息指标风险打分表.....	9
6.6 二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表.....	11
7 二氧化碳泄漏风险等级划分及监测要求.....	13
7.1 基于打分法的二氧化碳泄漏风险等级划分.....	13
7.2 基于风险等级划分结果的泄漏监测方案建议.....	14
7.3 二氧化碳发生泄漏的应急处置.....	16
参 考 文 献.....	17

## 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专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院武汉岩土力学研究所提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件起草单位：中国科学院武汉岩土力学研究所、西南石油大学、中国矿业大学、中国石油集团工程技术研究院有限公司、中国石油集团安全环保技术研究院有限公司、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质调查局水环中心、陕西延长石油（集团）有限责任公司、国家能源集团中国神华煤制油化工有限公司、中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司、东北石油大学、北京交通大学、中国石油大学（华东）、聊城大学。

本文件主要起草人：张力为、程小伟、陆诗建、白冰、靳建洲、张华、李小春、李琦、李兴春、杜显元、李义曼、刁玉杰、江绍静、王永胜、张德平、柏明星、张鹏伟、王维波、胡丽莎、罗婷婷、汤瑞佳、张成龙、郝文杰、魏宁、王燕、雷宏武、邓晨阳、赵东亚、崔振东、于永金、张弛、张春梅、梅开元、陈浮、付晓娟、王怀生、张征。

## 引 言

二氧化碳捕集、利用与地质封存（CO<sub>2</sub> capture, utilization and geological storage, CCUS）是指将二氧化碳从各类排放源和大气中分离后或直接加以利用或封存，以实现二氧化碳减排的工业过程。作为一项有望实现化石能源大规模低碳化利用的新兴技术，CCUS 技术受到国际社会的高度关注。我国已成为温室气体排放第一大国，加快部署二氧化碳地质封存、二氧化碳强化驱油、二氧化碳驱替煤层气等二氧化碳捕集、利用与封存项目是我国减少温室气体排放、到 2060 年实现碳中和目标的必然要求。

我国已出台了一系列 CCUS 相关的政策和规划，有序推进 CCUS 技术研发和示范。目前绝大多数 CCUS 示范工程属于将二氧化碳注入深部地层（二氧化碳储层）的地质利用与封存项目。二氧化碳注入储层后，会增大储层中的压力，并在储层中运移。如果潜在的泄漏途径（如井筒、断层等）与储层和盖层有交汇，则注入的二氧化碳可能会在压力和自身浮力的共同作用下通过泄漏途径向浅层地下水及大气迁移，造成二氧化碳的泄漏。因此，对二氧化碳发生泄漏的风险进行评价是保障 CCUS 示范工程成功实施的关键。本文件旨在为二氧化碳地质利用与封存示范工程的二氧化碳泄漏风险评价提供规范性的指导与借鉴，为 CCUS 示范工程与二氧化碳泄漏风险相关的评价与监测方案的制定提供依据。



# 二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范

## 1 范围

本文件规定了二氧化碳泄漏风险识别与环境本底值调查、二氧化碳泄漏风险分析、二氧化碳泄漏风险等级划分及监测要求。

本文件适用于二氧化碳地质封存、二氧化碳强化驱油、二氧化碳驱替煤层气等涉及二氧化碳注入地下的工程项目中二氧化碳泄漏的风险评价。

## 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 17741 工程场地地震安全性评价
- HJ 2.2 环境影响评价技术导则 大气环境
- HJ/T 166 土壤环境监测技术规范
- HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
- ISO 31000 风险管理 指南（Risk management – Guidelines）

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**二氧化碳地质利用 geological CO<sub>2</sub> utilization**

将二氧化碳注入条件适宜的地层，利用其驱替、置换、传热或化学反应等作用生产具有商业价值的产品，同时实现其与大气长期隔绝的工业过程。

### 3.2

**二氧化碳地质封存 geological CO<sub>2</sub> storage**

通过工程技术手段将工业源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。

### 3.3

**二氧化碳强化驱油 CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery**

将二氧化碳注入到油藏中，利用其与原油间的物理、化学、水力学作用，实现石油增采和部分二氧化碳封存的工业过程。

### 3.4

**二氧化碳驱替煤层气 CO<sub>2</sub>-enhanced coalbed methane recovery; CO<sub>2</sub>-ECBM**

将二氧化碳注入到深部煤层中，将煤层中的煤层气（CH<sub>4</sub>）驱替出来加以利用，同时实现部分二氧化碳地质封存的工业过程。

### 3.5

**储层 reservoir**

能够储存和渗透注入二氧化碳的地层。

### 3.6

**储层压力系数 reservoir pressure coefficient**

实测的储层地层压力与按同一地层深度计算的静水压力的比值。

3.7

**盖层 caprock**

位于储层之上，能够封隔储层，使注入的二氧化碳免于向上逸散的保护层。

3.8

**井筒 wellbore**

钻孔中由套管、水泥环、井眼构成的筒状结构，是沟通地面和二氧化碳储层的二氧化碳注入或监测通道。

3.9

**断层 fault**

岩体受力作用断裂后，两侧岩块沿断裂面发生显著位移的断裂构造。

3.10

**泄漏 leakage**

注入二氧化碳因上覆盖层密封失效、井筒完整性失效、断层封闭性失效等原因出现的二氧化碳、咸水、有机物等运移到盖层上方地层、浅层地下水、土壤、大气中的现象。

3.11

**超临界状态 supercritical state**

二氧化碳所处条件超过临界温度（31.1°C）与临界压力（7.38 MPa）时二氧化碳的相态。

3.12

**环空 annulus**

悬于井内的套管柱四周的空间，是二氧化碳和咸水通过井筒泄漏的重要通道。

3.13

**水泥环第一界面 cement sheath first interface**

井筒内套管和水泥环之间的胶结面。

3.14

**水泥环第二界面 cement sheath second interface**

水泥环与地层（或外层套管）之间的胶结面。

3.15

**突破压力 breakthrough pressure**

对二氧化碳地质封存而言，突破压力特指二氧化碳排开其他流体进入岩体内部的临界压力。

3.16

**泄漏监测 leakage monitoring**

通过地下水环境监测、二氧化碳通量与浓度监测、环境变化遥感监测等技术，监测储层、盖层、井筒、断层中二氧化碳的运移，监测地表二氧化碳浓度、通量和植被的变化，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。

3.17

**环境本底 environmental baseline value**

自然环境在未受污染的情况下，各种环境要素中化学元素或化学物质的基线含量。

3.18

**环境风险受体 environmental sensitive receiver**

在突发环境事件中可能受到危害的、具有一定社会价值或生态环境功能的单位或区域。

3.19

**特别保护区 special protected area**

飞机场、军事基地以及国务院和国务院有关部门及省、自治区、直辖市人民政府划定的野生动物保护区、生态保护红线区域、永久基本农田和其他需要特别保护的区域。

3.20

**二氧化碳羽 CO<sub>2</sub> plume**

注入储层中的二氧化碳形成的羽状流体团。

### 3.21

**断层活动速率** slip rate of fault

某一地层单元在一定时期内，因断裂活动形成的落差与相应沉积时间的比值。

### 3.22

**断层泥比率** shale gouge ratio

通过各种机理挤入断层的泥页岩的比例。

## 4 总则

### 4.1 概述

本章阐述了本文件所指的泄漏风险涵盖的范围、泄漏风险评价目标、泄漏风险评价总体流程。

### 4.2 泄漏风险涵盖的范围

4.2.1 本文件所讨论的泄漏风险，主要指将二氧化碳注入到目标储层导致的二氧化碳、咸水、有机污染物由盖层、井筒、断层等途径泄漏至盖层上部各地层、浅层地下水和大气中的可能性和发生此种泄漏造成的环境影响。

4.2.2 本文件用于在二氧化碳地质利用与封存项目选址设计阶段（二氧化碳注入前）对项目的泄漏风险进行评价。在项目选址设计阶段，宜尽可能搜集有助于泄漏风险判定的资料与数据。

4.2.3 泄漏风险评价范围界定：在水平维度，本文件以二氧化碳注入井为圆心，半径 2 km 范围为泄漏风险评价范围。在竖直维度，本文件以与盖层相邻的盖层上部第一个地层直到大气作为泄漏风险评价范围。

### 4.3 泄漏风险评价目标

本文件的泄漏风险评价目标，是在给定的二氧化碳地质利用与封存项目的选址与设计阶段，对该项目将要封存的二氧化碳由目标储层泄漏至盖层上部各地层、浅层地下水和大气中的可能性和泄漏造成的环境影响进行评价。

### 4.4 泄漏风险评价总体流程

基于 ISO 31000，制定了本文件的泄漏风险评价总体流程。具体如下：

- a) 风险识别。针对二氧化碳地质利用与封存项目前期选址与设计特点，提出了若干二氧化碳泄漏风险判定指标，根据项目的各项设计参数和风险判定指标对项目的二氧化碳泄漏风险进行识别；
- b) 风险分析。对于项目涉及的二氧化碳泄漏风险判定指标，采用打分法，给出每个指标的对应分值，该分值即反映项目存在该项风险的可能性和严重程度；
- c) 风险等级划分。基于风险分析给出的各二氧化碳泄漏风险判定指标的打分结果，对该项目的二氧化碳泄漏风险等级进行划分（可接受、可容忍和不可接受三级）。若项目的泄漏风险属于不可接受一级，则需调整项目设计，直至项目达到可接受或可容忍的分级标准；
- d) 风险监测建议。根据项目二氧化碳泄漏风险等级划分的结果，给出相对应的风险监测建议。

## 5 二氧化碳泄漏风险识别与环境本底值调查

### 5.1 二氧化碳泄漏风险源、驱动力、泄漏途径、泄漏影响范围和危害

#### 5.1.1 泄漏风险源

在当前的技术水平下,二氧化碳地质利用与封存的风险主要来源于复杂的地下状况和长周期地质封存的要求。在封存系统完整性损失、存在泄漏途径的情况下,二氧化碳发生泄漏的风险现实存在。主要的泄漏风险源包括以下3个:

- a) 封存区域井筒泄漏;
- b) 断层泄漏;
- c) 盖层微裂隙泄漏。

### 5.1.2 泄漏驱动力

注入储层的二氧化碳在浮力以及压力差的作用下会产生纵向以及横向的运移。

- a) 二氧化碳浮力  
二氧化碳注入地层后,由于自身的密度较低,会产生向上运动的趋势,称之为浮力。在二氧化碳浮力的作用下,产生纵向以及横向上运动的趋势。若盖层的封闭性较差,在浮力的作用下会发生泄漏。
- b) 储层与浅部地层之间的压力差  
储层深度较深,压力较大,而浅部地层压力较小,在压力梯度的作用下,二氧化碳会产生由储层向浅部地层运动的趋势。
- c) 浓度梯度驱动(分子扩散)  
溶解于储层水中的二氧化碳在浓度梯度的驱动下,由高浓度区域向低浓度区域扩散。

### 5.1.3 泄漏途径

在长期二氧化碳注入和封存过程中,可能发生二氧化碳逃逸和泄漏的途径包括以下3个:

- a) 井筒  
井筒(含注入井、监测井、废弃井等)直接连通二氧化碳储层和浅层地下水及大气,是二氧化碳地质利用与封存主要的泄漏途径之一。
- b) 断层  
断层是二氧化碳可能发生泄漏的地质构造,二氧化碳的注入会引起地层压力改变,造成有效应力降低,断层破裂带裂缝张开,渗透率增大。一旦张性断层与盖储层贯通,将形成CO<sub>2</sub>优势流,引发泄漏。
- c) 盖层  
二氧化碳长时间的注入会引起地层压力的增大,而地层压力的增大可能诱发盖层产生微裂隙,引起泄漏。

### 5.1.4 泄漏影响范围

二氧化碳注入储层后,会在浮力以及压力差的作用下发生扩散,形成二氧化碳羽。二氧化碳羽的覆盖范围与泄漏影响范围成正比,二氧化碳羽分布面积的增大在一定程度上会增加泄漏风险。

### 5.1.5 二氧化碳泄漏的危害

二氧化碳的泄漏对影响范围内的土壤、动物、植物以及人类的生活会产生危害。当土壤中二氧化碳的浓度超过一定浓度会造成植物的死亡;空气中的浓度超过一定浓度时,会对人体健康造成危害;同样,地下水二氧化碳超过一定浓度也会对地下水环境及地下生态系统产生影响。

## 5.2 二氧化碳泄漏风险判定指标

### 5.2.1 概述

基于5.1归纳的泄漏风险源、泄漏驱动力、泄漏途径、影响范围和危害,提出了二氧化碳泄漏风险判定指标(按风险贡献度由高到低排列):

- a) 井筒基本信息指标;
- b) 断层条件指标;
- c) 二氧化碳注入相关信息指标;

- d) 封存地质体基本信息指标；
- e) 二氧化碳泄漏环境影响指标。

### 5.2.2 井筒基本信息指标

包括以下指标：

- a) 井筒数量：若项目选址时，注入井附近已存在其他井筒，则二氧化碳通过已有井筒泄漏的可能性将增大。在选择注入井位置时，应避免存在泄漏风险的井筒密集区域，优先推荐钻井密度低的区域开展二氧化碳封存；
- b) 井斜：井斜增大时，固井质量出现问题的可能性亦随之增大，泄漏风险也越大；
- c) 钻井类型：一般正在使用的油气生产井、注气井、注水井、监测井等对泄漏发生的影响是较小的，但若井筒已废弃，则因缺乏维护，泄漏风险上升；
- d) 成井时间：井筒成井时间是影响泄漏风险的重要因素；
- e) 固井条件：固井质量、封固长度、水泥塞长度等固井条件对泄漏风险有显著影响；
- f) 事故历史：若某一井筒曾经发生过溢流、井涌等事故，则该井将具有发生泄漏的高风险。

### 5.2.3 断层条件指标

包括以下指标：

- a) 断层活动速率：断层活动速率用于衡量断层的活动性。取值越高，说明断层活动性越强，泄漏风险也越高；
- b) 断层泥比率：断层泥比率用于衡量断层的侧向封闭性。取值越高，说明断层中泥页岩、断层岩泥化涂抹的可能性越大，形成侧向封闭的可能性就越大；
- c) 断层位置：依据 GB 17741 的规定，对 I 级场地地震安全性评价工作近场区范围应外延至半径 25 km 范围。因此若注入井半径 25 km 范围内存在活动性强、封闭性差的断层，即认为二氧化碳地质封存工程场地泄漏风险高。

### 5.2.4 二氧化碳注入相关信息指标

包括以下指标：

- a) 二氧化碳注入量：二氧化碳注入量（包括总注入量和年二氧化碳注入量）决定了二氧化碳的运移范围和储层内压力积累的速度，与泄漏风险直接相关。当单位时间内二氧化碳注入量较大时，二氧化碳在储层中沿渗透率、孔隙度较大的区域流动显著加强，造成二氧化碳饱和度分布的不均衡，易引起泄漏；
- b) 二氧化碳注入压力：注入压力不应超过盖层破裂压力的 90%，以确保注入不会在盖层中产生新的裂隙或增加盖层中的现有裂隙。

### 5.2.5 封存地质体基本信息指标

包括以下指标：

- a) 储层深度：注入二氧化碳需要达到超临界状态，以增大二氧化碳存储量；
- b) 储层厚度：厚的储层更适合封存二氧化碳且减小泄漏风险；
- c) 储层压力系数：较低的初始储层压力系数有利于二氧化碳的注入，并减少压力显著积累的可能性，从而减小泄漏风险；
- d) 储层孔隙度及平均横向渗透率：较高的储层孔隙度和渗透率有利于二氧化碳的注入，并可减少压力显著积累的可能性，从而减小泄漏风险。平均横向渗透率对二氧化碳量和注入能力的影响最为显著；
- e) 储层岩性：砂岩和碳酸岩与二氧化碳反应程度适中，玄武岩与二氧化碳反应较迅速，有可能出现矿物过量溶解，影响地层稳定性的情况；
- f) 储层咸水矿化度：矿化度越低，通过化学方式封存的二氧化碳量越大；
- g) 盖层厚度：对于地下咸水层封存，盖层的厚度越大，注入的二氧化碳突破盖层发生泄漏的可能性越低。需考虑的厚度指标为紧邻储层上覆盖层厚度和至地表盖层累计厚度；

- h) 盖层覆盖范围：盖层若能够覆盖储层内二氧化碳羽的范围，且分布基本连续，则二氧化碳发生泄漏的风险显著降低；
- i) 盖层完整性：具有完整的储层-盖层组合，盖层密封性好，无裂隙或裂隙分布较离散，则二氧化碳发生泄漏的风险显著降低；
- j) 盖层渗透率：较低的盖层渗透率有利于二氧化碳在储层中长期封存，显著减少二氧化碳通过盖层泄漏的风险；
- k) 温度：较低的储层温度可增加二氧化碳密度，同时可以降低二氧化碳浮力，从而减少二氧化碳发生泄漏的风险。

### 5.2.6 二氧化碳泄漏环境影响指标

包括以下指标：

- a) 周边人口：一般情况下，空气中二氧化碳的浓度达到 3%~5%时，人就会感到恶心和眩晕；当浓度增加到 7%~10%时，将会使人失去意识，甚至导致死亡。因此，建议注入井与固定居民点的距离应大于 1000m，并且注入井应位于居民点的下风向；
- b) 注入井与特别保护区的距离：注入井距特别保护区较近时，若发生二氧化碳泄漏，可能对特别保护区造成环境危害。因此，注入井与特别保护区的距离应大于 3000m；
- c) 地下水：地下水是二氧化碳地质封存环境风险评估的主要受体。泄漏的二氧化碳、咸水等进入评估范围内的地下水后，一方面降低地下水 pH 值，另一方面改变地下水的溶解性总固体量（TDS），导致地下水的盐度增加。上述指标值如与环境本底值产生显著差异，则相当于地下水遭到泄漏的二氧化碳、咸水等的污染。为减小发生污染的可能性，建议注入井与受保护地下水区域的距离应大于 3000m；
- d) 空气质量：二氧化碳泄漏进入大气后，一方面形成持续的二氧化碳通量，另一方面造成泄漏点附近大气中二氧化碳的浓度波动。若二氧化碳通量和二氧化碳浓度与环境本底值产生显著差异，则表明空气遭到泄漏的二氧化碳的污染；
- e) 生态系统：二氧化碳泄漏可能对评估范围内的动植物与微生物群落的生长造成影响。

## 5.3 环境本底值调查

### 5.3.1 概述

开展环境本底值调查，能够为二氧化碳地质利用与封存项目地质模型和系统行为预测模型的开发提供基础数据，同时也是对二氧化碳地质利用与封存项目建设运行进行环境影响评价、制定有效的环境修复策略的前提。最重要的是，环境本底值调查可以获取与二氧化碳地质利用与封存项目建成投产后获得数据进行对比的基线数据。本文件建议对以下指标开展环境本底值调查：

- a) 地上空间监测指标；
- b) 地表监测指标；
- c) 地下监测指标。

### 5.3.2 地上空间监测指标

包括以下指标：

- a) 距地表 2m 高度范围内大气二氧化碳浓度；
- b) 大气二氧化碳通量；
- c) 大气 SF<sub>6</sub> 示踪剂浓度（可选）。

### 5.3.3 地表监测指标

包括以下指标：

- a) 地表浅层土壤二氧化碳通量；
- b) 地表植被的生长/健康状况；
- c) 雷达图像相位差（可选）。

### 5.3.4 地下监测指标

包括以下指标：

- a) 地下土壤二氧化碳通量；
- b) 浅层地下水水质指标：pH、溶解性总固体量、总硬度、溶解砷含量、溶解铅含量；
- c) 储层压力、温度；
- d) 紧邻盖层上部地层的温度、压力、水质指标；
- e) 垂直地质剖面地震（VSP）监测（可选）。

### 5.3.5 确定环境本底值

在评估范围内，基于上述监测指标，依据有关监测技术方法和标准（HJ 2.2、HJ 610、HJ/T 166），明确泄漏风险评价范围内的监测布点数目和监测频率，确定上述监测指标在环境风险受体中的环境本底值。

## 6 二氧化碳泄漏风险分析

### 6.1 总体要求

对于第 5 章列出的二氧化碳泄漏风险判定指标，采用打分法，给出每个指标的对应分值，该分值即反映二氧化碳地质利用与封存项目存在泄漏风险的可能性和严重程度。0.2 分、0.4 分、0.6 分、0.8 分、1 分分别对应高风险、较高风险、中风险、低风险、基本无风险。将每个指标的分值相乘，根据最终相乘结果判断项目总的二氧化碳泄漏风险。采用相乘法计算，是为了突出部分高风险指标（如存在活动断层）的权重。

### 6.2 井筒基本信息指标风险打分表

基于第 5 章提出的二氧化碳泄漏风险指标，制定了井筒基本信息指标风险打分表，纳入打分的指标包括场地现有的与二氧化碳储层交会的井筒数量、钻井时间、固井方式、固井质量等，具体见表 1。评估范围均为二氧化碳注入井半径 2 km 范围内，且列入打分的井筒需与二氧化碳储层或上覆盖层交会。

表 1 井筒基本信息指标风险打分表

打分项	指标范围	对应分值	备注
已有的与储层或上覆盖层交会的井筒数量	<10	1	
	10~50	0.8	
	>50	0.6	
井筒倾斜度	全部井筒倾斜度 $\leq 1.2$	1	
	存在倾斜度 $> 1.2$ 的井筒	0.8	
成井时间	全部井筒成井时间 $< 18$ 年	1	
	存在成井时间大于 18 年但在 1992 年之后成井的井筒	0.8	
	存在 1992 年之前成井的井筒	0.4	
井筒废弃时间	不存在废弃时间超过 5 年的井筒	1	若无废弃井，此项取 1 分
	存在废弃时间介于 5 年~13 年的井筒	0.8	
	存在废弃时间超过 13 年的井筒	0.6	
	存在无表层套管的井筒	0.6	

表1 井筒基本信息指标风险打分表（续）

打分项	指标范围	对应分值	备注
水泥环第一、第二界面固井质量	固井质量优，不存在自由段	1	
	固井质量中等，存在少量自由段但不贯通	0.8	
	固井质量差，存在大开度贯通自由段	0.4	
固井水泥环封固深度	固井水泥环封固至地表	1	
	固井水泥环未封固至地表	0.6	
废弃井封井水泥塞固封长度	固封长度>30m	1	若无废弃井，此项取1分
	固封长度 5m~30m	0.8	
	固封长度<5m	0.6	
	未进行水泥塞封井	0.2	
表层套管固井水泥底部位置	在地下水保护基线之下	1	
	等于或高于地下水保护基线	0.8	
井筒事故历史	所有井均无事故历史	1	
	有井出现过溢流、井涌等事故	0.6	
	有井出现过井喷事故	0.2	

### 6.3 断层条件指标风险打分表

基于第5章提出的二氧化碳泄漏风险指标，制定了断层条件指标风险打分表，纳入打分的指标包括断层活动速率和断层泥比率，具体见表2。

表2 断层条件指标风险打分表

打分项	指标范围	对应分值	备注
断层活动速率	注入井半径 25km 内不存在断层活动速率>500m/Ma 的断层	1	
	注入井半径 25km 内存在断层活动速率 500m/Ma~1000 m/Ma 的断层	0.8	
	注入井半径 25km 内存在断层活动速率>1000m/Ma 的断层	0.4	
断层泥比率	注入井半径 25km 内断层的断层泥比率均>75%	1	
	注入井半径 25km 内存在断层泥比率 60%~75%的断层	0.8	
	注入井半径 25km 内存在断层泥比率 50%~60%的断层	0.6	
	注入井半径 25km 内存在断层泥比率<50%的断层	0.4	

#### 6.4 二氧化碳注入信息风险打分表

打分的主要参数包括二氧化碳注入量和注入压力，具体见表 3。

表 3 二氧化碳注入信息风险打分表

打分项	指标范围	对应分值	备注
项目计划二氧化碳注入总量	<300 万吨	1	
	300 万吨~1000 万吨	0.8	
	>1000 万吨	0.6	
项目计划年二氧化碳注入量	<50 万吨	1	
	50 万吨~150 万吨	0.8	
	>150 万吨	0.6	
项目计划注入压力	注入压力与盖层内部流体压力之差小于盖层突破压力	1	
	注入压力与盖层内部流体压力之差大于等于盖层突破压力，且注入压力小于等于盖层破裂压力的 90%	0.8	
	注入压力达到盖层破裂压力的 90%~100%	0.4	
	注入压力大于盖层破裂压力	0.2	

#### 6.5 封存地质体基本信息指标风险打分表

基于第 5 章提出的二氧化碳泄漏风险指标，制定了封存地质体基本信息指标风险打分表，纳入打分的指标包括二氧化碳储层深度、上覆盖层厚度、盖层完整性等，具体见表 4。

表 4 封存地质体基本信息指标风险打分表

打分项	指标范围	对应分值	备注
储层深度	1000m~3500m	1	储层深度指储层顶面到地表的距离。多储层注入时，取最浅的储层
	800m~1000m 或 >3500m	0.8	
	<800m	0.6	
储层厚度	>50m	1	多储层注入时，取最薄储层的厚度
	50m~20m	0.8	
	<20m	0.6	
储层压力系数	<0.9	1	
	0.9~1.1	0.8	
	>1.1	0.6	

表 4 封存地质体基本信息指标风险打分表（续）

打分项	指标范围	对应分值	备注
储层孔隙度	>12%	1	
	4%~12%	0.8	
	<4%	0.6	
储层平均横向渗透率	>10 mD	1	
	5 mD~10 mD	0.8	
	<5 mD	0.6	
储层岩性	砂岩、碳酸岩	1	
	玄武岩	0.8	
储层咸水矿化度	≤50,000 mg/L	1	
	>50,000 mg/L	0.8	
紧邻储层上覆盖层厚度	>20m	1	多储层注入时，取最薄的盖层
	10m~20m	0.8	
	<10m	0.6	
至地表盖层累计厚度	>300m	1	
	150m~300m	0.8	
	<150m	0.6	
盖层覆盖范围	盖层完全覆盖储层内二氧化碳羽的范围	1	
	盖层覆盖储层内二氧化碳羽的范围在95%以上	0.8	
	盖层覆盖储层内二氧化碳羽的范围≤95%	0.6	
盖层完整性	盖层完整，无裂隙或裂隙分布较离散	1	
	盖层完整性一般，存在少量裂隙	0.8	
	盖层完整性差，存在大量裂隙	0.4	
盖层渗透率	<10 <sup>-3</sup> mD	1	
	≥10 <sup>-3</sup> mD	0.8	
地热梯度	<40°C/km	1	
	≥40°C/km	0.8	
以注入井为圆心，25km半径范围内是否有活动断层	此范围内无活动断层	1	
	此范围内存在活动断层	0.2	

## 6.6 二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表

基于第5章提出的二氧化碳泄漏风险指标，制定了二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表，纳入打分的指标包括周边人口、保护区、地下水、生态系统等，具体见表5。为准确地确定二氧化碳泄漏造成环境影响的风险打分赋值，在打分前，需要对二氧化碳泄漏造成的环境影响进行预评估。具体预评估流程如下：

- a) 确定二氧化碳泄漏环境影响评估范围。评估范围包括时间和空间范围。时间范围指二氧化碳开始注入、注入中、场地关闭及关闭后的时间跨度；空间范围指可能会受到注入活动影响的地上和地下空间。本文件建议评估时间范围为二氧化碳开始注入到场地关闭后100年，空间横向范围为二氧化碳注入井半径2 km范围内，空间纵向范围为紧邻盖层的上部第一个地层直至大气；
- b) 系统地识别环境影响评估范围内潜在的环境风险受体；
- c) 开展环境本底值监测；
- d) 基于数值模拟估算的二氧化碳泄漏可能性与泄漏量，结合环境本底值和环境风险受体，对二氧化碳泄漏造成环境影响的过程进行数值模拟，从而对二氧化碳泄漏造成的环境影响程度进行量化评估，并给出对应的风险打分赋值（见表5），为二氧化碳泄漏风险等级划分提供依据。

表5 二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表

打分项	指标范围	对应分值	备注
注入井与固定居民点的距离	>1500m	1	
	1000m~1500m	0.8	
	<1000m	0.4	
注入井与居民点的主导风向关系	在居民居住地点的下风向	1	
	在居民居住地点的侧风向	0.8	
	在居民居住地点的上风向	0.6	
注入井与特别保护目标区的距离	>4000m	1	
	3000m~4000m	0.8	
	<3000m	0.6	
注入井与受保护地下水区域的距离	>4000m	1	
	3000m~4000m	0.8	
	<3000m	0.6	
注入井与上述敏感区域的相对海拔高度	评估范围内，注入井口海拔高度低于上述全部敏感区域	1	二氧化碳密度较大，若注入井口海拔高度高于上述敏感区域，则二氧化碳造成危害的可能性增大。
	评估范围内，注入井口海拔高度高于某一或多个敏感区域	0.8	

表5 二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表（续）

打分项	指标范围	对应分值	备注
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——pH值的变化	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 pH 与环境本底值相比变化量 $\leq$ 5%且 pH 未低于 6.5	1	若 pH 的环境本底值低于 6.5，则 pH 变化量 $\leq$ 10%取 1 分，>10%取 0.8 分
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 pH 与环境本底值相比变化量为 5%~10%且 pH 未低于 6.5	0.8	
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 pH 与环境本底值相比变化量>10%或 pH 降低到 6.5 以下	0.6	
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——溶解性总固体量（TDS）的变化	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 TDS 与环境本底值的比值 $\leq$ 3 且 TDS 未超过 500 mg/L	1	若环境本底值高于 500 mg/L，则 TDS 与环境本底值的比值 $\leq$ 7 取 1 分，>7 取 0.8 分
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 TDS 与环境本底值的比值为 3~7 且 TDS 未超过 500 mg/L	0.8	
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中 TDS 与环境本底值的比值>7 或 TDS 超过 500 mg/L	0.6	
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——环境有害物质（砷）的变化	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中砷浓度 $\leq$ 0.55 $\mu$ g/L	1	若环境本底值>0.55 $\mu$ g/L，说明环境风险受体在 CO <sub>2</sub> 泄漏前已被砷污染，此项取 1 分。
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中砷浓度为 0.55 $\mu$ g/L~10 $\mu$ g/L	0.8	
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中砷浓度>10 $\mu$ g/L	0.6	
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——环境有害物质（铅）的变化	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中铅浓度 $\leq$ 0.15 $\mu$ g/L	1	若环境本底值>0.15 $\mu$ g/L，说明环境风险受体在 CO <sub>2</sub> 泄漏前已被铅污染，此项取 1 分。
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中铅浓度为 0.15 $\mu$ g/L~15 $\mu$ g/L	0.8	
	在评估时间范围内，地表水、地下水等环境风险受体中铅浓度>15 $\mu$ g/L	0.6	

表5 二氧化碳泄漏环境影响评估与风险打分表（续）

打分项	指标范围	对应分值	备注
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——二氧化碳通量的变化	在评估时间范围内，大气、土壤等环境风险受体中二氧化碳通量 $\leq 2 \times 10^4$ mg/(m <sup>2</sup> h)	1	若环境本底二氧化碳通量 $> 2 \times 10^4$ mg/(m <sup>2</sup> h)，说明环境风险受体在CO <sub>2</sub> 泄漏前已有天然CO <sub>2</sub> 存在，此项取1分。
	在评估时间范围内，大气、土壤等环境风险受体中二氧化碳通量为 $2 \times 10^4$ mg/(m <sup>2</sup> h)~ $4 \times 10^4$ mg/(m <sup>2</sup> h)	0.8	
	在评估时间范围内，大气、土壤等环境风险受体中二氧化碳通量 $> 4 \times 10^4$ mg/(m <sup>2</sup> h)	0.6	
发生二氧化碳泄漏情境下，评估范围内环境风险受体中监测因子——近地表大气二氧化碳浓度的变化	在评估时间范围内，近地表大气中二氧化碳浓度 $\leq 10^3$ mg/kg	1	若环境本底值 $> 10^3$ mg/kg，说明环境风险受体在CO <sub>2</sub> 泄漏前已有天然CO <sub>2</sub> 存在，此项取1分。
	在评估时间范围内，近地表大气中二氧化碳浓度为 $10^3$ mg/kg~ $10^4$ mg/kg	0.8	
	在评估时间范围内，近地表大气中二氧化碳浓度 $> 10^4$ mg/kg	0.6	
生态系统——动植物与微生物群落	在评估时间范围内，二氧化碳泄漏导致的浓度升高低于动植物和微生物的耐受阈值	1	
	在评估时间范围内，二氧化碳泄漏导致的浓度升高达到或超过动植物和微生物的耐受阈值	0.6	

## 7 二氧化碳泄漏风险等级划分及监测要求

### 7.1 基于打分法的二氧化碳泄漏风险等级划分

基于第6章中二氧化碳泄漏风险判定指标的打分结果，将项目的二氧化碳泄漏风险划分为可接受、可容忍和不可接受三级，对应打分如表6所示。对于泄漏风险为可接受的项目，适用于简化的泄漏监测方案；泄漏风险为可容忍的项目，适用于严格的泄漏监测方案；泄漏风险为不可接受的项目，需调整工程设计方案并进行再评估，直至项目满足可接受或可容忍分级。

表6 二氧化碳泄漏风险等级划分表

风险划分	对应打分范围	备注
可接受	0.02~1	适用于简化的泄漏监测方案
可容忍	$10^{-4}$ ~0.02	适用于严格的泄漏监测方案
不可接受	$< 10^{-4}$	需调整工程设计方案并进行再评估，直至项目满足可接受或可容忍分级，否则不应继续开展该项目

## 7.2 基于风险等级划分结果的泄漏监测方案建议

### 7.2.1 泄漏风险为可接受项目的监测方案设计建议

7.2.1.1 若项目的泄漏风险划分结果为可接受，则后续在项目运行阶段建议采用简化的二氧化碳泄漏监测方案。建议监测方案采取的监测方式主要包括地上空间监测、地表监测、地下监测、井内监测四类，监测持续时间建议为二氧化碳开始注入到注入完成后 10 年。

#### a) 地上空间监测方案

地上空间监测方案包括近地表大气二氧化碳浓度监测、大气二氧化碳通量监测。

- 1) 近地表大气二氧化碳浓度监测方案：以注入井为中心，监测半径为 2 km，即注入井周围 10 km<sup>2</sup> 的范围。每两月监测 1 次距离地表 2m 处二氧化碳浓度分布；
- 2) 大气二氧化碳通量监测：通量塔的位置应综合考虑安全、观测范围、建筑物影响、人为活动、汽车尾气排放等因素；涡动相关设备安装在 10 m 高度处，可以观测到 350 m 半径范围内的通量增加量。连续监测距离地表 5m 和 10m 的大气二氧化碳通量。

#### b) 地表监测方案

地表监测方案包括地表浅层土壤二氧化碳通量的监测、地表植被的生长/健康状况监测。

- 1) 地表浅层土壤二氧化碳通量的监测：监测时，首先将土壤呼吸室置于土壤表面，然后连接在二氧化碳气体分析仪上，接好进气管和出气管。每个点位重复测量读数 3 次，取平均值作为监测点的土壤二氧化碳通量。根据该项目的环境监测方案，每两月监测 1 次地表土壤的二氧化碳通量；
- 2) 地表植被的生长/健康状况监测：基于二氧化碳泄漏对农业生态系统（玉米、苜蓿等）的影响机理，定期观察封存场地典型地表植被叶面、根茎形态的变化，并判断相关形态变化是否与二氧化碳泄漏相关联。

#### c) 地下监测方案

地下监测方案主要包括地下土壤二氧化碳通量监测、井底监测、浅层地下水水质监测、盖层上部地层深井取样与监测等。

- 1) 地下土壤二氧化碳通量监测：以注入井为中心，监测半径为 2 km，即注入井周围 10 km<sup>2</sup> 的范围。连续监测距离地下 10m 处土壤二氧化碳通量；
- 2) 井底监测：在注入井的目标储层深度处设置监测装置，长期监测、记录井底压力、温度数据；
- 3) 浅层地下水水质监测：以注入井为中心，监测半径为 2 km，即注入井周围 10 km<sup>2</sup> 的范围。每两月监测 1 次地下水 pH、溶解性总固体量、环境有害物质含量；
- 4) 盖层上部地层深井取样与监测：每两月监测 1 次紧邻盖层的上部地层的温度、压力及地层水质。

#### d) 井内监测方案

井内监测方案包括生产套管壁缺陷（腐蚀和磨损）监测、环空压力监测及水泥环一、二界面固井质量及水泥环完整性监测。

- 1) 生产套管壁缺陷（腐蚀和磨损）监测：通过声波测井、变密度测井、磁脉冲探伤等方法，每六月监测 1 次套管柱各部件（套管鞋、封隔器、筛管等）的位置；监测在管柱剖面上管柱内径的变化；检查管壁缺陷，评价磨损程度；
- 2) 环空压力监测：在封存井各环空处设置监测装置，每天一次监测、记录所有环空的压力变化；
- 3) 水泥环第一、第二界面固井质量及水泥环完整性监测：通过声波水泥测井法，每六月测井 1 次，监测关键层位（盖层段连续 25m）水泥环第一、第二界面固井质量及水泥环完整性变化。

7.2.1.2 监测方案详见表 7。

表 7 二氧化碳泄漏监测方案（简化）

监测位置	监测方式	监测指标	监测频率
地上空间监测	近地表大气二氧化碳浓度监测	距离地表 2 m 的大气二氧化碳浓度	每两月
	二氧化碳通量监测	距离地表 5 m 和 10 m 的大气二氧化碳通量	连续
地表监测	土壤二氧化碳通量监测	浅层土壤二氧化碳通量	每两月
	地表植被的生长状况监测	定期观察典型地表植被叶面、根茎形态变化	每三月
地下监测	土壤二氧化碳通量监测	地下土壤 10 m 深处二氧化碳通量	连续
	土壤层下部浅层地下水水质监测	pH、溶解性总固体量、环境有害物含量（砷、铅）	每两月
	紧邻盖层上部地层深井取样与温压监测	温度、压力、pH、溶解性总固体量	每两月
	二氧化碳注入井井底温度压力监测	温度、压力	长期
井内监测	井筒套管壁缺陷（腐蚀和磨损）	套管柱各部件的位置、管柱剖面上管柱内径的变化、管壁缺陷	每年
	评估范围内存在井筒的所有环空压力情况	环空压力变化是否在 30 日平均变化范围内	每天
	水泥环第一、第二界面固井质量及水泥环完整性	声波水泥测井曲线	每六月

### 7.2.2 泄漏风险为可容忍项目的监测方案设计建议

若项目的泄漏风险划分结果为可容忍，则后续在项目运行阶段建议采用严格的二氧化碳泄漏监测方案。与 7.2.1 类似，建议监测方案采取的监测方式主要包括地上空间监测、地表监测、地下监测、井内监测四类，监测方案见表 8。

表 8 二氧化碳泄漏监测方案（严格）

监测位置	监测方式	监测指标	监测频率
地上空间监测	近地表大气二氧化碳浓度监测	距离地表 2 m 的大气二氧化碳浓度	每月
	二氧化碳通量相关参数监测	距离地表 5 m 和 10 m 的大气二氧化碳通量	连续
	近地表大气 SF <sub>6</sub> 示踪剂浓度监测	距离地表 2 m 的大气 SF <sub>6</sub> 示踪剂浓度	每月
地表监测	土壤二氧化碳通量监测	浅层土壤二氧化碳通量	每月
	雷达地表变形监测	雷达图像相位差信息	每月
	地表植被的生长状况监测	定期观察典型地表植被叶面、根茎形态变化	每月

表8 二氧化碳泄漏监测方案（严格）（续）

监测位置	监测方式	监测指标	监测频率
地下监测	土壤原位二氧化碳通量监测	地下土壤10 m深处二氧化碳通量	连续
	土壤层下部浅层地下水水质监测	pH、溶解性总固体量、环境有害物含量（砷、铅）	每月
	紧邻盖层上部地层深井取样与温压监测	温度、压力、pH、溶解性总固体量	每月
	垂直地质剖面地震（VSP）监测	VSP 地震监测结果	共4次
	四维地震监测	四维地震监测结果	至少1次
	二氧化碳注入井井底温度压力监测	温度、压力	长期
井内监测	生产套管壁缺陷（腐蚀和磨损）	套管内径、管壁厚度及横截面的变形；套管损伤，即腐蚀损伤和机械损伤（磨损、裂缝、断裂、切口等）；射孔层段和筛管（必要时）位置；套管接头连接程度；不密封区域	每六月
	评估范围内存在井筒的所有环空压力情况	环空压力变化是否在30日平均变化范围内	每天2次
	水泥环第一、第二界面固井质量及水泥环完整性	声波水泥测井曲线	每三月

### 7.3 二氧化碳发生泄漏的应急处置

7.3.1 泄漏风险为可接受和可容忍的项目均应制定二氧化碳发生泄漏的应急处置方案。应急处置方案应包含以下内容：

- a) 对事故类型及危害程度进行分析与评估；
- b) 设计应急响应程序，划分响应责任；
- c) 结合实际泄漏位置，制定明确的二氧化碳泄漏补救措施。

7.3.2 对于泄漏风险为可容忍的项目，应急处置方案的制定和实施应由专人负责，方案应包括详细的工作人员疏散安排并考虑二氧化碳大量泄漏造成局部冷却时，设备和部件能否正常运行。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 28911 石油天然气钻井工程术语
- [2] JB/T 13413 燃煤烟气二氧化碳储存装备
- [3] SY/T 5374.1 固井作业规程 第1部分: 常规固井
- [4] SY/T 5374.2 固井作业规程 第2部分: 特殊固井
- [5] SY/T 5431 井身结构设计方法
- [6] SY/T 5466 钻前工程及井场布置技术要求
- [7] SY/T 5480 固井设计规范
- [8] SY/T 6565 石油天然气开发注二氧化碳安全规范
- [9] SY/T 6592 固井质量评价方法
- [10] ISO 27914 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage— Geological storage
- [11] ISO 27916 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub>-EOR)
- [12] 李小春, 彭斯震, 白冰等. 二氧化碳捕集利用与封存词典[M]. 世界图书出版公司, 2013.
- [13] 李小舟, 马瑶, 李红中. 关于 CO<sub>2</sub> 地质封存场址选择的探讨[A]. 中国可持续发展研究会. 2009 中国可持续发展论坛暨中国可持续发展研究会学术年会论文集(上册)[C]. 中国可持续发展研究会: 中国可持续发展研究会, 2009:6.
- [14] 喻英, 李义连, 杨国栋, 刘丹青, 姜凤成, 杨森. 储层物性参数对 CO<sub>2</sub> 长期封存能力的影响研究[J]. 安全与环境工程, 24(05):75-83+89, 2017.
- [15] Chadwick R A, Arts R, Bernstone C, et al. Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers - observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects [R]. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication No. 14, 2008.
- [16] National Energy Technology Laboratory (NETL). Best Practices: Operations for Geologic Storage Projects [R]. DOE/NETL-2017/1848, Morgantown, MV, 2017.
- [17] 孙亮, 陈文颖. CO<sub>2</sub> 地质封存选址标准研究[J]. 生态经济, 07: 33-38+46, 2012.
- [18] 杨芳. 盐水层二氧化碳封存机理与地质模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [19] 张二勇, 李旭峰, 何锦等. 地下咸水层封存 CO<sub>2</sub> 的关键技术研究[J]. 地下水, 200(3): 15-19, 2009.
- [20] 中国 21 世纪议程管理中心等. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究[M]. 地质出版社, 2012.
- [21] Kaldi J, Gibson-Poole C. Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO<sub>2</sub> Storage Projects [J]. Report No: RPT08-1001, CO<sub>2</sub> CRC, Canberra, ACT, AU, 2008.
- [22] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 李旭峰, 张徽. 深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质储存地质安全性评价方法研究[J]. 中国地质, 38(03):786-792, 2011.
- [23] 刘永忠, 王乐, 张甲六. 封存 CO<sub>2</sub> 的泄漏过程预测与泄漏速率的影响因素特性[J]. 化工学报, 63(04): 1226-1233, 2012.
- [24] Bai B, Li X, Wu H, Wang Y, Liu M. A methodology for designing maximum allowable wellhead pressure for CO<sub>2</sub> injection: application to the Shenhua CCS demonstration project, China[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 7(1), 158-181, 2017.
- [25] 环境保护部. 二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)[R], 2016.
- [26] 周丹蕊. 储层物性参数对 CO<sub>2</sub> 长期封存能力的影响研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 38(05): 113-114+118, 2018.
- [27] 沈平平, 廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 石油工业出版社, 2009.
- [28] 王重卿. 二氧化碳地质储存安全风险评价方法研究[D]. 华北电力大学, 2013.
- [29] International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage[M]. 2009.
- [30] 李琦, 蔡博峰, 陈帆, 刘桂臻, 刘兰翠. 二氧化碳地质封存的环境风险评估方法研究综述[J]. 环境工程, 37(02): 13-21, 2019.
- [31] 张力为, 李琦等. 二氧化碳地质利用与封存的风险管理[M]. 科学出版社, 2020.

[32] Watson, T. L., & Bachu, S. Identification of Wells With High CO<sub>2</sub>-Leakage Potential in Mature Oil Fields Developed for CO<sub>2</sub>-Enhanced Oil Recovery[C]. In SPE Symposium on Improved Oil Recovery, 2008.

[33] 匡冬琴, 李琦, 陈征澳, 刘兰翠. 全球CCUS废弃井法规现状及其对中国的启示[J]. 天然气与石油, 33(04): 37-41+9, 2015.

[34] 张贤, 李阳, 马乔, 刘玲娜. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 23(6):70-80, 2021.

[35] 李勤英, 罗凤芝, 苗翠芝. 断层活动速率研究方法及应用探讨[J]. 断块油气田, 2000(02): 15-17+4.

[36] 杨智, 何生, 王锦喜, 刘琼. 断层泥比率(SGR)及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2005(03): 347-351.

---