



团 体 标 准

T/CNCA 065—2024

二氧化碳深部咸水层地质封存泄漏 监测指标体系

Indicator system for leakage monitoring in carbon dioxide
geological storage in deep saline aquifers

2024-06-12 发布

2024-10-01 实施

中国煤炭工业协会 发 布
中国标准出版社 出 版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 监测方式、阶段与关键参数	2
5 监测技术方案要求	4
6 监测报告撰写要求	6
参考文献	7

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。

本文件由中国煤炭工业协会提出。

本文件由中国煤炭工业协会科技发展部归口。

本文件起草单位：中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司、中国矿业大学(北京)、中国科学院武汉岩土力学研究所、北京低碳清洁能源研究院。

本文件主要起草人：韩来喜、白冰、王永胜、张凯、周玲妹、魏宁、张力为、王燕、熊日华、马瑞、赵英杰。

二氧化碳深部咸水层地质封存泄漏 监测指标体系

1 范围

本文件规定了用于陆上二氧化碳地质封存监测的技术,涉及系统的目的、原理、术语和定义、监测对象、监测流程以及监测报告撰写要求。

本文件适用于陆上二氧化碳地质封存工程注入前、注入中、注入后各阶段,监测范围包括空中、地表、地下和井内。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

二氧化碳地质封存 carbon dioxide 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。

3.2

储层 reservoir

二氧化碳被注入的目标地层。

3.3

盖层 caprock

储层上方对二氧化碳注入后能够起到封闭作用的致密地层。

3.4

缓冲层 buffer layer

盖层上方作为安全缓冲的致密地层。

注:主要是提供额外的安全保护,防止封存的二氧化碳发生泄漏。

3.5

碳捕获与封存 carbon capture and storage; CCS

将二氧化碳从工业或相关排放源中分离出来,输送到封存地点,并长期与大气隔离的过程。

3.6

地面变形 surface deformation

注入影响范围内因二氧化碳的注入压力集聚引起的地表标高出现变化。

3.7

二氧化碳通量 CO₂ flow rate

单位时间内流经单位面积的二氧化碳的量。

3.8

井筒 well

钻孔中由套管、水泥环、井眼构成的筒状结构,用于流体采出、注入或监测,沟通地面和储层的通道。

3.9

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。

3.10

环空 tubing-casing annular

悬于井内的套管柱四周的空间,二氧化碳和咸水通过井筒泄漏的重要通道。

3.11

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。

3.12

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。

3.13

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。

3.14

风险 risk

不确定性对目标的影响,本文件特指泄漏发生的概率和泄漏造成的环境影响两者综合作用对二氧化碳地质利用与封存项目安全性的影响。

3.15

固井质量 well completion quality

固井作业的施工质量,主要指标是水泥和地层的胶结情况,以及强度质量。

3.16

泄漏监测 leakage detection

通过地下水环境监测、地表形变监测、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,监测地表植被、地物、地形的变化,以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。

4 监测方式、阶段与关键参数

4.1 监测方式

监测方式分类根据监测实施的位置,将监测方式分为空中监测、地表监测、地下监测、井中监测四类,具体如下。

- a) 空中监测:空中监测主要是对封存场址上方大气环境中二氧化碳浓度进行实时监测。
- b) 地表监测:地表监测包括土壤二氧化碳通量浓度监测、地表植被生长状况监测以及地表形变监测三类。
- c) 地下监测:地下监测包括二氧化碳羽流情况监测、地下水环境监测、地下土壤监测。
- d) 井中监测:井中监测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第一界面、

水泥环第二界面固井质量及水泥环完整性监测。

4.2 监测阶段

整个二氧化碳地质封存项目的生命周期包括注入前、注入、关闭与关闭后 4 个阶段（I、II、III、IV）。不同项目阶段监测目的见表 1。

表 1 封存项目各阶段监测目的

项目阶段	持续时间	主要监测目的
注入前（I）	3~5年	场地表征与场地评估
		进行安全、环境与风险评估的基准
		开发地质模型与系统行为的预测模型
		开发有效的修复策略
		建立未来场地运行性能对比的基线数据
注入（II）	5~50年	监测、核查与报告制度需求
		验证封存的物质是否安全
		场地满足当地的健康、安全和环境性能标准
		为利益相关方提供信心,特别是项目早期与运行阶段
关闭（III）	—	与注入期相同的目的
		提供系统将按预测结果发展的证据,判定场址的安全性后,场地可关闭与移交
关闭后（IV）	—	除特殊情况外无需特别监测,基本安全监测持续时间为 20~50 年

4.3 监测关键参数

规模化二氧化碳注入的地层关键参数如下：

- a) 封存场地上空二氧化碳浓度与通量；
- b) 地表变形量；
- c) 地层的地球物理与地球化学参数变化,如:地震波速、导电率、微震、化学物质等参数；
- d) 地层应力应变与变形量；
- e) 地下声发射事件；
- f) 不同地层空间范围内的地层流体压力与压力参数(深部与浅层)；
- g) 地层内气体成分与浓度,如:二氧化碳浓度与通量；
- h) 地层内水质成分与电化学参数(pH、TDS、EC等)；
- i) 井筒范围内的物理与化学性质变化。

监测技术涉及的关键指标如表 2 所示。

表 2 监测技术涉及的关键指标

序号	I 级指标层	II 级指标层	III 级指标层	监测阶段
1	空中监测	大气环境	大气二氧化碳浓度与通量	I、II、III、IV
2	地表监测	植被生态、土壤微生物、动物、人体健康	生态指标	II、III、IV
3		地表变形	地层应力应变监测、地面隆起或沉陷	I、II、III、IV

表 2 监测技术涉及的关键指标（续）

序号	I 级指标层	II 级指标层	III 级指标层	监测阶段	
4	地下监测	土壤环境	土壤二氧化碳浓度与通量	I、II、III、IV	
5			土壤湿度		
6			土壤温度		
7		地球物理参数	地震波速、微震、电阻率、等物理参数	I、II、III、IV	
8		地球化学参数	矿物成分、流体成分	I、II、III、IV	
9		浅层地下水环境监测	水压	I、II、III、IV	
10			水流		
11			水温		
12			地下水电化学		
13			水质成分		
14			气体成分		
15		地下地层参数	温度压力、应力应变、变形(静力与动力)	I、II、III、IV	
16		井中监测	井筒监测	套管与水泥环完整性	I、II、III、IV
17				环空压力	I、II、III、IV
18				环空流体成分	I、II、III、IV

5 监测技术方案要求

5.1 基本原则

根据具体的监测方式选择相对应的监测技术与监测指标。监测持续时间宜根据项目规模、所在区域地质条件、人口以及生态环境等因素,确定合适的监测持续时间。监测技术根据监测对象的空间位置可以划分为:空中监测、地表监测、地下监测和井中监测。

5.2 空中监测技术与指标

CCS 项目空中监测要求应按表 3 执行。

表 3 推荐空中监测技术、监测指标与监测频率

监测类型	推荐监测对象	推荐监测技术	推荐监测指标	建议监测频率
空中监测	大气二氧化碳浓度	固定监测点监测	距离地表约 2 m 的大气二氧化碳浓度	连续
		无人机监测	距离地表约 5 m 的大气二氧化碳浓度	每 2 个月 1 次
	垂直二氧化碳通量	高空飞机监测、卫星监测	整个封存场地上方大气二氧化碳浓度	每 6 个月 1 次
		固定监测点监测	距离地表 5 m 和 10 m 的大气中垂直二氧化碳通量	连续
	井口二氧化碳浓度监测	固定监测点监测	井口 5 m 范围内二氧化碳浓度通量	连续

5.3 地表监测技术与指标

CCS 项目地表监测要求应按表 4 执行。

表 4 推荐地表监测技术、监测指标与监测频率

监测类型	推荐监测对象	推荐监测技术	推荐监测指标	建议监测频率
地表监测	地表形变	合成孔径雷达干涉测量	雷达图像相位差信息	二氧化碳注入期内监测 10~15次
	浅层土壤二氧化碳含量	便携式二氧化碳土壤呼吸 测量系统	地下 10 m 以上浅层土壤二 氧化碳通量	每 2 个月 1 次
			地下 10 m 以上浅层土壤二 氧化碳浓度	每 2 个月 1 次
	地表植被生长状况	光谱遥感	植被光谱差异	每 3 个月 1 次
		肉眼观察	典型地表植被叶面、根茎形 态变化	每 3 个月 1 次

5.4 地下监测技术与指标

CCS 项目地下监测要求应按表 5 执行。

表 5 推荐地下监测技术、监测指标与监测频率

监测类型	推荐监测对象	推荐监测技术	推荐监测指标	建议监测频率
地下监测	二氧化碳羽流 监测	3D 时移地震垂直地质剖 面地震(VSP)监测、微震 监测	通过波速变化获取二氧化碳 晕在空间分布	二氧化碳注入期内监测 2 次或 以上,注入结束后监测 2 次或 以上
	二氧化碳注入 井周边温度压 力监测	温度传感器	温度	连续
		压力传感器	压力	连续
	地下水环境	原位保真取样监测	pH、溶解性总固体量、钙镁离 子含量、环境有害物质含量(砷、 铅)等	每月 1 次
地下土壤	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	

5.5 井中监测技术与指标

CCS 项目井中监测要求应按表 6 执行。

表 6 推荐井中监测技术、监测指标与监测频率

监测类型	推荐监测对象	推荐监测技术	推荐监测指标	建议监测频率
井中监测	套管柱	声波测井、变密度测井、磁脉 冲探伤等	套管柱各部件腐蚀磨损情况、管柱剖面上 管柱内径的变化	每年 1 次

表 6 推荐井中监测技术、监测指标与监测频率（续）

监测类型	推荐监测对象	推荐监测技术	推荐监测指标	建议监测频率
井中监测	环空带压	环空处理设压力监测装置	环空压力	持续
	压力应变	应力应变监测	应力或应变值	持续
	环空流体成分	二氧化碳浓度与水质监测仪	二氧化碳浓度与水质	连续
	固井质量	声波水泥测井技术	水泥环第一界面固井质量	每年1次
			水泥环第二界面固井质量	每年1次
			水泥环完整性	每年1次

6 监测报告撰写要求

完整的监测报告应包括第 5 章推荐的各指标的监测结果,监测结果应由专人审核,确保监测结果的准确性。报告内容至少应包含以下信息:

- a) 储层温压连续数据及离子浓度与监测精度;
- b) 盖层温压连续数据及离子浓度与监测精度;
- c) 缓冲层理化性质参数与水质气质参数与监测精度;
- d) 地层与地面变形监测(应力应变监测)与监测精度;
- e) 地层物理参数变化反演二氧化碳在晕的空间展布范围与监测精度;
- f) 土壤通量与浓度变化曲线与监测精度;
- g) 近地表二氧化碳浓度变化曲线与监测精度;
- h) 完整的监测报告应包含各指标监测结果与异常判别;
- i) 对于未涵盖的监测技术指标亦可进行说明。

参 考 文 献

- [1] GB/T 28911 石油天然气钻井工程术语
- [2] HJ 2.2—2018 环境影响评价技术导则 大气环境
- [3] HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范
- [4] HJ 610—2016 环境影响评价技术导则 地下水环境
- [5] JB/T 13413 燃煤烟气二氧化碳储存装备
- [6] SY/T 5374.1 固井作业规程 第1部分:常规固井
- [7] SY/T 5374.2 固井作业规程 第2部分:特殊固井
- [8] SY/T 5431 井身结构设计方法
- [9] SY/T 5466 钻前工程及井场布置技术要求
- [10] SY/T 5480 固井设计规范
- [11] SY/T 6565 石油天然气开发注二氧化碳安全规范
- [12] SY/T 6592 固井质量评价方法
- [13] ISO 27914 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage—Geological storage
- [14] ISO 27916 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage—Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO₂-EOR)
- [15] ISO 31000 Risk management—Guidelines
- [16] 李小春,彭斯震,白冰,等. 二氧化碳捕集利用与封存词典[M]. 北京:世界图书出版公司, 2013.
- [17] 李小舟,马瑶,李红中. 关于CO₂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.
- [18] 喻英,李义连,杨国栋,等. 储层物性参数对CO₂长期封存能力的影响研究[J]. 安全与环境工程, 2017,24(05):75-83+89.
- [19] Chadwick R A, Arts R, Bernstone C, et al. Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers-observations and guidelines from the SACS and CO₂ STORE projects [R]. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication No. 14, 2008.
- [20] National Energy Technology Laboratory (NETL). Best Practices: Operations for Geologic Storage Projects [R]. DOE/NETL-2017/1848, Morgantown, MV, 2017.
- [21] 孙亮,陈文颖. CO₂地质封存选址标准研究[J]. 生态经济, 2012,07: 33-38+46.
- [22] 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.
- [23] 张二勇,李旭峰,何锦,等. 地下咸水层封存CO₂的关键技术研究[J]. 地下水, 2009, 200(3): 15-19.
- [24] 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]. 北京:地质出版社, 2012.
- [25] Kaldi J, Gibson-Poole C. Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO₂ Storage Projects [J]. Report No: RPT08-1001, CO₂ CRC, Canberra, ACT, AU, 2008.
- [26] 刁玉杰,张森琦,郭建强,等. 深部咸水层CO₂地质储存地质安全性评价方法研究[J]. 中国地质, 2011,38(03):786-792.

- [27] 刘永忠,王乐,张甲六.封存CO₂的泄漏过程预测与泄漏速率的影响因素特性[J].化工学报,2012,63(04):1226-1233.
- [28] Bai B, Li X, Wu H, Wang Y, Liu M. A methodology for designing maximum allowable well-head pressure for CO₂ injection: application to the Shenhua CCS demonstration project, China[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 7(1), 158-181, 2017.
- [29] 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.
- [30] 周丹蕊.储层物性参数对CO₂长期封存能力的影响研究[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(05):113-114+118.
- [31] 沈平平,廖新维.二氧化碳地质封存与提高石油采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2009.
- [32] 王重卿.二氧化碳地质储存安全风险评价方法研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [33] International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage[M].2009.
- [34] 李琦,蔡博峰,陈帆,等.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,2019,37(02):13-21.
- [35] 张力为,李琦,等.二氧化碳地质利用与封存的风险管理[M].北京:科学出版社,2020.
- [36] Watson, T. L., & Bachu, S. Identification of Wells With High CO₂-Leakage Potential in Mature Oil Fields Developed for CO₂-Enhanced Oil Recovery[C]. In SPE Symposium on Improved Oil Recovery, 2008.
- [37] 匡冬琴,李琦,陈征澳,等.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.
- [38] 张贤,李阳,马乔,等.我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J].中国工程科学,2021,23(6):70-80.
- [39] 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.
- [40] 杨智,何生,王锦喜,等.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.
- [41] 李琦,刘桂臻,张建,等.二氧化碳地质封存环境监测现状及建议[J].地球科学进展,28(6):718-27,2013.
- [42] Jenkins, C., Chadwick, A., Hovorka, S.D. The state of the art in monitoring and verification—Ten years on[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2015,40,312-349.
- [43] Wei, N., Li, X., Jiao, Z., et al. A Hierarchical Framework for CO₂ Storage Capacity in Deep Saline Aquifer Formations. Frontiers in Earth Science,2022.
- [44] 石晖,刘兰翠,李琦.二氧化碳地质封存与高放射性核废物地中处置的环境影响对比分析[J].中国人口资源与环境,2015,25(5S):203-07.
- [45] 魏凤,李小春,刘玫,等.CCS国际标准化进展剖析及对我国的启示[J].科技管理研究,2014,34(6):201-05.
- [46] 周颖,蔡博峰,曹丽斌,等.中国碳封存项目的环境应急管理研究[J].环境工程,2018,36(2):1-5.
- [47] Li, Q., H. Shi, D. Yang, X. Wei. Modeling the Key Factors That Could Influence the Diffusion of CO₂ from a Wellbore Blowout in the Ordos Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(4):3727-38.

[48] 刁玉杰,刘廷,魏宁,等.咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路.中国地质.2023,50(3):943-951.

全国团体标准信息平台

中国煤炭工业协会
二氧化碳深部咸水层地质封存泄漏
监测指标体系

T/CNCA 065—2024

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 21 千字
2024年11月第一版 2024年11月第一次印刷

*

书号:155066·5-9316 定价 31.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权所有 侵权必究

举报电话:(010)68510107



T/CNCA 065—2024