

团体标准《二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评估规范》 (征求意见稿) 编制说明

1. 项目背景

二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）是指将二氧化碳从工业排放源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。国际能源署（IEA）发布的 2008 年报告《Energy Technology Perspectives 2008》提出 CCUS 技术是解决气候变化问题的必要技术，并在 2016 年的报告《Energy Technology Perspectives 2016》中预计，在 2050 年 CCUS 技术将贡献全球二氧化碳减排量的 12%，位居减排量贡献来源第三位。

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、二氧化碳强化采油、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。自 2006 年以来，国务院、国家发展和改革委员会、科学技术部、环境保护部等国家部委先后参与制定并发布了 20 余项国家政策和发展规划，如《国家应对气候变化规划（2014-2020 年）》、《“十三五”控制温室气体排放工作方案》、《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019 版）》等，有力地推动了中国 CCUS 技术的研发和示范。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第 75 届联合国大会期间提出，中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这标志着 CCUS 技术在中国迎来了新的黄金发展机遇期。目前，中国已拥有神华鄂尔多斯二氧化碳咸水层封存示范项目、延长石油集团二氧化碳强化驱油示范项目等十多个 CCUS 示范工程。

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（如废弃井筒、断层等）与储层有交汇，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。然而，目前国内尚无可供参考的二氧化碳泄漏风险评价标准，对二氧化碳地质利用与封存项目与泄漏风险相关的评价、监测等应如何具体实施缺乏依据。国外制定的 CCUS 相关标准，如美国环保署二氧化碳地质封存 VI 类井建设、测试、监测、记录保存和数据管理系列标准、加拿大标准协会（CSA）制定的二氧化碳地质封存标准只含有定性且高度概括的二氧化碳泄漏风险评价论述，缺乏具体、定量的控制指标，可操作性差。因此，编制《二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范》，可以有效地填补我国乃至国际上在二氧化碳泄漏风险评价标准制定方面的空白，具有重要意义。

在国家相关政策的大力支持下，目前我国已有多项 CCUS 大型项目处于选址、设计、建设及运行阶段，未来十年内会有更多 CCUS 项目上马。目前对 CCUS 领域相关标准的制定恰逢时机，将会对我国 CCUS 技术、行业的发展带来极大的促进作用。制定封存二氧化碳泄漏风险评价规范，是科技部《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图》明确指出的“加快我国 CCUS 风险评估和风险管理标准的制定”中的重要组成部分，必将在未来 CCUS 大型项目的风险评价环节广泛应用。

《二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范》将成为我国第一个对 CCUS 项目二氧化碳泄漏风险评价流程进行规范的行业标准，体现的是我国环保行业积极应对气候变化和保障生态环境安全的责任和担当。此标准的发布将会引导国内 CCUS 环境风险的深入研究，为我国未来 CCUS 项目的开展提供风险评价依据，有效解决目前 CCUS 项目实践过程中面临的相关技术规范缺乏等亟待解决的问题，减少利益相关方的各种顾虑，确保 CCUS 项目的顺利开展。与此同时，标准的出台可提升民众对 CCUS 的认知度，提升 CCUS 项目的规范性，是未来我国 CCUS 项目大规模建设运行的重要保障。

2. 工作简况

2.1 任务来源

为贯彻落实《中华人民共和国标准化法》、《深化标准化工作改革方案》（国发[2015]13号）、《关于培育和发展团体标准的指导意见》、《团体标准管理规定》（国标委联[2019]1号）的要求，进一步发挥科技社团通过先进标准引领行业创新发展的作用，加快建立和完善与国家标准、行业标准等协调互补的生

态环境领域团体标准体系，依据《中国环境科学学会标准管理办法（试行）》的有关规定，中国环境科学学会标准工作办公室负责开展组织团体标准申报工作，由中国科学院武汉岩土力学研究所负责此项标准起草工作。

2.2 工作过程

在完成中国环境科学学会团体标准申报和立项工作后，标准编写组通过现场调研和文献资料等进行数据收集，确定了具有普适性的二氧化碳地质利用与封存项目（二氧化碳咸水层封存、二氧化碳强化驱油等）二氧化碳泄漏风险判定指标，并基于文献资料和专家打分，给出了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。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。基于上述内容，标准编写组形成了完整的标准草案，并经专家咨询会论证，形成了标准的公开征求意见稿。

3. 标准的编制原则和主要内容

本标准制定的原则：科学性、适用性和可操作性。

本标准涉及的主要内容包括二氧化碳泄漏风险评估概述、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。

1) 二氧化碳泄漏风险评估概述：阐述了二氧化碳泄漏风险的定义、涵盖的范围、泄漏风险评价目标、泄漏风险评价总体流程。

2) 二氧化碳泄漏风险识别与环境本底值调查：阐述了二氧化碳泄漏驱动力、泄漏途径、泄漏影响范围和危害；提出了对应的二氧化碳泄漏风险判定指标；明确了环境本底值调查的必要性和一般流程。

3) 二氧化碳泄漏风险分析：制定了井筒基本信息指标、断层条件指标、二氧化碳注入信息指标、封存地质体基本信息指标、二氧化碳泄漏环境影响指标的风险打分表，给出了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。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。

4) 二氧化碳泄漏风险等级划分及监测要求：基于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。对于泄漏风险为可接受的项目，给出了简化的泄漏监测方案建议；对于泄漏风险为可容忍的项目，给出了严格的泄漏监测方案建议。对于分级结果为不可接受的项目，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。

4. 标准相关数据参考依据

4.1 泄漏风险评价范围界定依据

在水平维度，本标准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。该评价范围的选取参考了神华鄂尔多斯二氧化碳咸水层封存项目的水质监测和近地表二氧化碳浓度监测范围^[1]。

4.2 表 1（井筒基本信息指标）参考依据

已有的与储层或上覆盖层交会的井筒数量：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

井筒倾斜度：1.2 这一判定边界值基于^[2]确定。

成井时间：18 年这一判定边界值基于^[2]确定。1992 年成井这一判定边界值基于我国 1992 年颁布的《固井设计规范》^[3]确定。在此之前成井的井筒因固井设计无统一要求，二氧化碳泄漏风险较高。

井筒废弃时间：5 年这一判定边界值经编写专家组讨论确定。13 年这一判定边界值基于^[2]确定。

水泥环第一、第二界面固井质量：此指标的提出和评价依据基于^[2]确定。

固井水泥环封固深度：此指标的提出和评价依据基于^[2]确定。

废弃井封井水泥塞固封长度：30 m 这一判定边界值基于^[2]确定，其余判定边界值经编写专家组讨论确定。

井筒事故历史：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

4.3 表 2（断层条件指标）参考依据

断层活动速率：各判定边界值基于^[4-6]确定。

断层泥比率：各判定边界值基于^[7]确定。

断层位置：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^[8]。因此若近场区 25 km 范围内存在活动断层，即认为二氧化碳地质封存工程场地泄漏风险高^[9]。

4.4 表 3（二氧化碳注入信息指标）参考依据

项目计划二氧化碳注入总量：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

项目计划年二氧化碳注入量：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

项目计划注入压力：注入压力与盖层内部流体压力之差如超过盖层突破压力，说明存在二氧化碳通过盖层泄漏的风险^[1]；美国环保署（EPA）标准^[10]规定注入压力不得大于盖层破裂压力的 90%，如注入压力超过盖层破裂压力的 90%，将产生较高的泄漏风险。

4.5 表 4（封存地质体基本信息指标）参考依据

储层深度：800m 和 3500m 两个判定边界值基于^[11]确定。考虑到中风险和基本无风险之间应有过渡范围，经编写专家组讨论，以 800m~1000m 作为中风险和基本无风险之间的过渡范围。

储层厚度：50m 和 20m 两个判定边界值基于^[12-13]确定。

储层压力系数：0.9 和 1.1 两个判定边界值基于^[11]确定。

储层孔隙度：4%和 12%两个判定边界值基于^[11]确定。

储层平均横向渗透率：5 mD 和 10 mD 两个判定边界值基于^[11]确定。

储层岩性：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

储层咸水矿化度：50,000mg/L 这一判定边界值基于^[11]确定。

紧邻储层上覆盖层厚度：10 m 和 20 m 两个判定边界值基于^[11]确定。

至地表盖层累计厚度：150 m 和 300 m 两个判定边界值基于^[11]确定。

盖层覆盖范围：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

盖层完整性：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

盖层渗透率： 10^{-3} mD 这一判定边界值基于^[14]确定。

地热梯度：推荐地热梯度 $<40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[15]。

4.6 二氧化碳泄漏环境影响评估时间范围参考依据

本标准所指的二氧化碳泄漏环境影响评估，仅限于在项目选址阶段，通过数值模拟手段，对泄漏环境的影响进行的预测，不涉及项目运行后，基于监测数据的环境影响评估。本标准建议二氧化碳泄漏环境影响评估的时间范围为二氧化碳开始注入到注入终止后 10 年，该时间参考美国 Illinois-Decatur CCS 项目监测持续时间确定^[16]。

4.7 表 5（二氧化碳泄漏环境影响评估指标）参考依据

注入井与固定居民点的距离：1000 m 这一判定边界值基于^[17]确定；1500 m 这一判定边界值经编写专家组讨论确定。

注入井与居民点的主导风向关系：此指标的提出和选择依据基于^[11]确定。

注入井与特别保护目标区的距离：3000 m 这一判定边界值基于^[11]确定；4000 m 这一判定边界值经编写专家组讨论确定。

注入井与受保护地下水区域的距离：3000 m 这一判定边界值基于^[11]确定；4000 m 这一判定边界值经编写专家组讨论确定。

注入井与上述敏感区域的相对海拔高度：此指标的提出和选择依据经编写专家组讨论确定。

pH 值的变化：以美国环保署（EPA）规定的 pH 临界值（6.5）为判断依据^[18]，当数值模拟结果表明，在评价时间内因泄漏导致 pH 降低到 6.5 以下，则说明产生中等环境风险。此外，提出了 pH 变化量 $\leq 5\%$ 和 $\leq 10\%$ 两个附加的判定边界值^[19]。

溶解性总固体量（TDS）的变化：以美国环保署（EPA）规定的 TDS 临界值（500 mg/L）为判断依据^[18]，当数值模拟结果表明，在评价时间内因泄漏导致 TDS 升高到 500 mg/L 以上，则说明产生中等环境风险。此外，提出了 TDS 变化量 ≤ 3 倍和 ≤ 7 倍两个附加的判定边界值^[19]。

环境有害物（砷）的变化：以美国环保署（EPA）规定的砷浓度临界值（10 $\mu\text{g/L}$ ）为判断依据^[18]，当数值模拟结果表明，在评价时间内因泄漏导致砷浓度升高到 10 $\mu\text{g/L}$ 以上，则说明产生中等环境风险。此外，提出了砷浓度值 0.55 $\mu\text{g/L}$ 这一附加的判定边界值^[20]。

环境有害物（铅）的变化：以美国环保署（EPA）规定的铅浓度临界值（15 $\mu\text{g/L}$ ）为判断依据^[18]，当数值模拟结果表明，在评价时间内因泄漏导致铅浓度升高到

15 $\mu\text{g/L}$ 以上，则说明产生中等环境风险。此外，提出了铅浓度值 0.15 $\mu\text{g/L}$ 这一附加的判定边界值^[20]。

二氧化碳通量的变化：参考神华鄂尔多斯 CCS 项目二氧化碳注入后各监测指标的安全等级，选择 $2 \times 10^4 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{h})$ 和 $4 \times 10^4 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{h})$ 两个判定边界值^[21]。

近地表大气二氧化碳浓度的变化：参考神华鄂尔多斯 CCS 项目二氧化碳注入后各监测指标的安全等级，选择 10^3 mg/kg 和 10^4 mg/kg 两个判定边界值^[21]。

生态系统——动植物与微生物群落：此指标的提出和选择依据基于^[11]确定。

4.8 表 6（二氧化碳泄漏风险等级划分）选择依据

可接受和可容忍的划分阈值是基于内蒙古某项目各风险指标取值的计算结果。该项目所处场地的地质构造较为简单，项目建设前无已有的井筒，项目开展了持续的二氧化碳泄漏监测，未发现泄漏证据，因此将该项目风险指标计算值（0.02）和高于该值的项目列为风险可接受项目。可容忍和不可接受的划分阈值是基于山东某项目各风险指标取值的计算结果。该项目所处场地的地质构造较为复杂，项目建设前已存在大量生产和废弃井筒，因此将该项目风险指标计算值（ 10^{-4} ）和高于该值的项目列为风险可容忍项目。

4.9 监测方案中二氧化碳注入结束后持续监测时间选择依据

本标准建议二氧化碳注入结束后在现场的持续监测时间为 10 年，该时间参考美国 Illinois-Decatur CCS 项目监测持续时间确定^[16]，与本标准建议的二氧化碳泄漏环境影响评估时间范围一致。

5. 涉及专利情况

CN 103712834 B 基于深井取样的室内保真取样、存样与分析装置及方法

CN 102108861 B 井内分层气液两相流体保真取样装置

6. 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

标准发布后，将由中科院武汉岩土力学研究所牵头，制定明确的标准宣贯培训计划。拟撰写新闻稿，通过新闻媒体进行宣贯，并邀请二氧化碳地质利用与封存领域的知名专家在相关学术会议上宣传该标准。拟通过中石化石油工程设计有限公司和中国神华煤制油化工有限公司，将该标准应用于现有和拟建设的 CCUS 示范工程中。拟在已开展或计划开展 CCUS 示范工程建设的企业，以及从事 CCUS

相关研究的高校和科研院所召开若干次标准培训会，通过对相关领域从业人员的培训，增进上述人员对该标准的了解，为该标准真正在工程实践中发挥作用提供支撑。此外，拟在相关的学术会议和博览会租借展台，在学术会议和博览会现场开展标准宣贯、培训和相关技术交流会。

7. 国内国际标准对比情况

国内外尚无专门针对二氧化碳泄漏风险进行评价并对风险进行管控的相关标准，部分指标参照 ISO/TC265 已发布的《碳捕集、运输与地质封存——管道运输系统》、《碳捕集、运输与地质封存——地质封存》等国际标准以及美国环保署二氧化碳地质封存 VI 类井建设、测试、监测、记录保存和数据管理系列标准、加拿大标准协会（CSA）制定的二氧化碳地质封存标准、挪威船级社（DNV）二氧化碳地质封存项目选址及评价标准实施。

8. 与现行相关法律、法规、规章及相关标准的协调性

截至目前，我国已颁布了危险废物贮存污染控制标准、地下水质量标准、固定污染源烟气排放连续监测技术规范、环境污染源自动监测信息传输交换技术规范、水污染源在线监测系统安装、验收以及排放总量监测技术规范、国控重点污染源自动监控能力建设项目污染源监控现场端建设规范等污染物泄漏风险评价与监测标准、规范。《二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范》的制定将填补上述标准、规范未涉及的二氧化碳泄漏风险评价与监测的内容，成为上述标准、规范的重要补充，实现与现有标准的协调配套，发挥标准体系的效益。

9. 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在草案征求意见过程中无重大分歧。

10. 贯彻标准的要求和措施建议

本标准确定的指标基于充分的文献调研和工程实践经验，符合大多数 CCUS 示范工程的实际情况。该标准可直接在行业内大多数 CCUS 示范工程中贯彻实施。本标准可提高相关行业的技术水平，建议尽早实施。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Watson T L, Bachu S. Identification of Wells With High CO₂-Leakage Potential in Mature Oil Fields Developed for CO₂-Enhanced Oil Recovery. SPE Symposium on Improved Oil Recovery, 2008.
- [3] SY/T 5480-1992. 固井设计规范[S].
- [4] 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.
- [5] 万涛, 蒋有录, 林会喜, 彭传圣, 毕彩芹. 断层活动性和封闭性的定量评价及与油气运聚的关系——以车西洼陷曹家庄断阶带为例[J].石油天然气学报,2010,32(04):18-24+422-423.
- [6] 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2003(S1): 12-20.
- [7] 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.
- [8] GB 17741-2005. 工程场地地震安全性评价[S].
- [9] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 李旭峰, 张徽. 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, 38(03): 786-792, 2011.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, 2012. Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Construction Guidance[S].
- [11] 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.
- [12] 喻英, 李义连, 杨国栋, 刘丹青, 姜凤成, 杨森. 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, 24(05):75-83+89, 2017.
- [13] 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 CO₂STORE projects [R]. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication No. 14, 2008.
- [14] Mbia, E. N., Frykman, P., Nielsen, C. M., Fabricius, I. L., Pickup, G. E., & Bernstone, C. Caprock compressibility and permeability and the consequences for pressure development in CO₂ storage sites. International Journal of Greenhouse Gas Control, 22, 139-153, 2014.
- [15] Kaldi J, Gibson-Poole C. Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO₂ Storage Projects [R]. Report No: RPT08-1001, CO₂ CRC, Canberra, ACT, AU, 2008.
- [16] Archer Daniels Midland Company. Monitoring, Reporting, and Verification Plan CCS#2[R]. Technical Report No.: 180.60.ENV.309, 2017.
- [17] SY/T 6277-2017. 硫化氢环境人身防护规范[S].
- [18] U.S. Environmental Protection Agency. Statistical Analysis of Groundwater Monitoring Data at RCRA Facilities, Unified Guidance[R]. Technical Rpt. EPA 530/R-09-007, Washington, D.C., 2009.
- [19] Xiao, T., McPherson, B., Esser, R., Jia, W., Dai, Z., Chu, S., Pan, F., Viswanathan, H.

Chemical Impacts of Potential CO₂ and Brine Leakage on Groundwater Quality with Quantitative Risk Assessment: A Case Study of the Farnsworth Unit[J]. *Energies*, 13, 6574, 2020.

[20] Qafoku, N., Zheng, L., Bacon, D. H., Lawter, A. R., & Brown, C. F. A Critical Review of the Impacts of Leaking CO₂ Gas and Brine on Groundwater Quality[R]. Technical Report No.: PNNL-24897, 2015.

[21] 赵兴雷, 李小春, 陈茂山等. 陆相低渗咸水层 CO₂封存关键技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.