

附件 3

《二氧化碳捕集、利用与封存环境风
险评估技术指南》
(征求意见稿)

编制说明

项目名称：二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南

项目统一编号：

起草单位：环境保护部环境规划院、中国科学院武汉岩土力学研究所、
环境保护部环境工程评估中心和中国地质调查局水文地质环境地质
调查中心

主要起草人：刘兰翠、曹东、张战胜、李琦、张徽、崔青等

环境保护部环境规划院项目管理人：曹东

环保部科技标准司项目管理人：於俊杰、赵卫

目录

1 任务来源.....	1
2 指南制定的意义.....	1
3 指南编制原则与技术依据.....	2
3.1 编制原则.....	2
3.2 编制依据.....	2
4 主要编制工作过程.....	3
5 指南主要技术内容及说明.....	3
5.1 关于适用范围的说明.....	3
5.2 关于二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估方法的说明.....	4
5.3 关于二氧化碳捕集环节环境风险的说明.....	8
5.4 关于二氧化碳运输环节环境风险的说明.....	8
5.5 关于二氧化碳利用与封存环节环境风险的说明.....	9
5.6 关于二氧化碳利用与封存环节环境风险的影响界定说明.....	13
6 指南实施建议.....	13

《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》

（征求意见稿）

编制说明

1 任务来源

二氧化碳捕集与封存技术（CCS）是指将二氧化碳从工业或相关能源产业的排放源中分离出来，输送并封存在地质构造中，长期与大气隔绝的过程；二氧化碳捕集、利用与封存技术（CCUS）是在 CCS 的基础上强调二氧化碳的利用。尽管 CCUS 技术二氧化碳减排效果非常显著，但环境安全性存在很大的不确定性。2013 年环境保护部印发了《关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知》（环办[2013]101 号），提出“探索建立环境风险防控体系”、“推动环境标准规范制定”等要求，为落实该要求，环境保护部科技标准司组织环境保护部环境规划院、中国科学院武汉岩土力学研究所、环境保护部环境工程评估中心、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心等单位，开展了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》编制工作。

2 指南制定的意义

（1）指导我国 CCUS 项目环境风险评估

近年来我国 CCUS 示范项目发展很快，从项目数量和封存规模来看，已成为继美国之后的第二大国家。部分示范项目的二氧化碳捕集、利用与封存能力已达到百万吨规模，成为世界上较大的 CCUS 示范项目。然而，与美国和欧盟相对完善的 CCUS 环境风险管理制度相比，我国尚没有适用于 CCUS 的环境风险评估与管理体系，已滞后于技术和示范项目的发展。其主要原因是 CCUS 项目相对一般的建设项目，具有二氧化碳属性难以确定、技术成熟度不高、地质条件复杂、封存时期大、流程长等特点，现行的环境影响评价技术导则和建设项目环境风险评价技术导则难以直接套用。

（2）规范我国 CCUS 环境风险管理

CCUS 环境风险评估是管理部门开展环境风险管理的前提和基础。本指南通过指导项目在环境风险源和环境风险受体识别的基础上，开展环境风险评估和风险管理工作。一方面，

有助于项目运行方提高对 CCUS 环境风险的认识，强化环境风险管理；另一方面，有助于政府部门开展有针对性的环境监管，有效降低和控制全过程可能出现的各类环境风险，提高环境安全性。

（3）引导 CCUS 健康发展

环境安全性是影响 CCUS 发展和推广应用的制约因素之一，加强 CCUS 的环境风险管理是确保二氧化碳减排效果，提高决策者和公众接受度的核心保障，并能包容 CCUS 技术的不断创新。本指南填补了当前我国 CCUS 技术环境风险管理的空白，有利于推动和规范我国 CCUS 的环境风险评估和管理，引导 CCUS 技术的健康发展。

3 指南编制原则与技术依据

3.1 编制原则

（1）可操作原则

在确保二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南编制工作科学性与规范性的同时，提高环境风险管理的可操作性和实用性。

（2）适用原则

针对 CCUS 项目不同环节、技术和工艺，提出适合 CCUS 技术和工艺特点的环境风险评估技术方法。

（3）分类指导原则

充分考虑不同环节、技术、工艺以及封存地域的环境风险特征差异，尽可能涵盖所有与 CCUS 技术相关的环境风险评估及管理。

3.2 编制依据

本指南在编制过程中，参考了如下法律、相关政策、标准等，具体包括：

《中华人民共和国环境保护法》

《关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知》（环办[2013]101 号）

GB 3095-2012 环境空气质量标准

GB 3838-2002 地表水环境质量标准

GB/T 14848-1993 地下水质量标准

GB 15618-1995 土壤环境质量标准

HJ 2.1-2011 环境影响评价技术导则总纲

HJ 2.2-2008 环境影响评价技术导则大气环境

HJ/T 2.3-1993	环境影响评价技术导则地面水环境
HJ 19-2011	环境影响评价技术导则生态影响
HJ 610-2011	环境影响评价技术导则地下水环境
HJ/T 349-2007	环境影响评价技术导则陆地石油天然气开发建设项目
HJ/T 169-2004	建设项目环境风险评价技术导则

当上述法规、标准和文件被修订时，使用其最新版本。

4 主要编制工作过程

(1) 2014 年 3 月成立编制组：环境保护部科技标准司组织环境保护部环境规划院、中国科学院武汉岩土力学研究所、环境保护部环境工程评估中心、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心等单位，成立了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》编制技术组。

(2) 2014 年 5 月召开大纲讨论会：收集国内外有关技术指南的资料，召开大纲讨论会，确定了指南编写大纲及工作进度安排。

(3) 2014 年 7 月编写《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》初稿。

(4) 2014 年 10 月 21 日环保部科技标准司在北京召开《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》（第一稿）专家咨询会，编制组根据审议意见，对文稿进行修改，形成了第二稿。

(5) 2014 年 10 月 29 日环保部科技标准司在北京召开《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》（第二稿）专家咨询会，编制组根据审议意见，对文稿进行修改，形成了第三稿及编制说明。

(6) 2014 年 11 月 6 日编制组针对《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》（第三稿）和编制说明进行了内部讨论，形成了第四稿及编制说明第二稿。

(7) 2014 年 11 月 19 日编制组邀请部分 CCUS 项目示范单位及专家对《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》（第四稿）和编制说明进行了深入讨论，形成了第五稿及编制说明第三稿。

5 指南主要技术内容及说明

5.1 关于适用范围的说明

二氧化碳利用主要包括地质利用、化工利用和生物利用三大类，其中地质利用主要包括

七种主要类型：二氧化碳强化石油开采(CO₂-EOR)、二氧化碳驱替煤层气开采(CO₂-ECBM)、二氧化碳强化天然气开采(CO₂-EGR)、二氧化碳增强页岩气开采(CO₂-ESGR)、二氧化碳增强地热系统(CO₂-EGS)、二氧化碳铀矿浸出增采(CO₂-EUL)、二氧化碳强化深部咸水开采(CO₂-EWR)。与化工利用、生物利用相比，地质利用具有二氧化碳利用量大，工艺复杂，环境风险较大等特征。因此，本指南中的二氧化碳利用与封存涵盖所有在地下地质结构中注入二氧化碳的利用和/或封存行为，暂不包括化工利用和生物利用。

二氧化碳地质封存包括陆上封存和离岸封存。鉴于目前我国 CCUS 示范项目以陆上地质利用封存为主，而且环保部门主要监管陆上新、改、扩建项目的环境影响评价。因此，本指南适用于陆上新建或改扩建二氧化碳捕集、利用与封存项目环境风险的评估。

5.2 关于二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估方法的说明

目前 CCUS 环境风险评估和管理主要集中在封存环节，评估方法包括定性方法和定量方法，如表 1 所示。其中，定性方法主要依据专家知识和经验，定量方法则需要大量的参数和假设作为支撑。总体上，国际上 CCUS 环境风险评估选择了以定性为主的评价方法。考虑到我国当前 CCUS 正处于试验示范阶段，相关基础数据积累较少，而且大部分定量模型和方法正在开发，尚不成熟，本指南推荐以定性评估为主的风险矩阵法。

表 1 环境风险评估方法

机构/个人	评价方法	工具		类型(定性 P、定量 Q、定性与定量结合 S)
		名称	状态 (公开/内部)	
Quintessa	FEP (Feature, Event, and Process)	Quintessa FEP database	公开	P
Quintessa	PA (Performance Assessment)	TESLA, QPAC-CO2, Quintessa FEP database	公开	S
Quintessa	ESL (Evidence Support Logic)	NA	NA	S
TNO	TNO 风险评估方法	SIMED II	内部	Q
TNO	CASSIF (Carbon Storage Scenario Identification Framework)	基于 SQL 的 FEP 数据库, VUE 进行 FEP 交互的可视化	内部	P
TNO	ICARAS (Integrated Carbon Risk Assessment)	CASSIF, COSE, PFRAC, SEMI, Cougar™, EFFECTS, RISKCURVES	内部/公开	S
RITE	FEP (Feature, Event, and Process)	RITE-DB	内部	P
URS	RISQUE (Risk Identification and Strategy using Quantitative Evaluation)	MS excel	公开	S
AIST	基于先验概率的定量评价	GERAS-CO2GS	内部	Q

LANL	CO2-PENS	GoldSim	Goldsim 商业软件， FEHM 内部代码	Q
LANL	IAM (Integrated assessment modelling)	NA	NA	Q
DNV	CO ₂ QUALSTORE 指南	NA	NA	S
DNV	SWIFT (Structured What-If Technique)	NA	NA	P
Schlumberger Services	Carbon Workflow (基于 FEP)	NA	NA	S
Oxand, Schlumberger	P&R (Performance & Risk Methodology)	SIMEO™-STOR	内部	Q
U.S.EPA	VEF (Vulnerability Evaluation Framework)	NA	NA	P
BRGM	Bow-tie diagrams	GERICO database	内部	P
Shell	ESL (Evidence Support Logic), Bow-tie diagrams, ALARP (As Low As Reasonably Practicable)	TESLA	公开	P
INERIS	FT (Fault trees)	BowTie software	公开	P
C.M.Oldenburg	CF (Certification Framework)	Tough2 + CMG-GEM	公开	Q
C.M.Oldenburg	SRF (Screening and Ranking Framework)	MS excel	公开	P

Ecofys Netherlands	DPSIR (Drivers,Pressures,State,Impact,and Responses) framework	NA	NA	P
Jeffrey M.Bielicki	RISCS (Risk Interference Subsurface CO ₂ Storage)	NA	NA	Q
Behdeen Oraee-Mirzamani	FTA & AHP (Fault Tree Analysis & Analytical Hierarchy Process)	NA	NA	P
A.Cherkaoui	MOSAR (Method Organized for a Systematic Analysis of Risk)	NA	NA	S
IRSM-CAS	Updated SRF (Screening and Ranking Framework)	MS excel	公开	P
IRSM-CAS	IRSM-CAS 风险评估方法	ABAQUS + ECLIPSE	内部	Q
IRSM-CAS	CO2RISKEYE	Goldsim+AEEA+MS excel	内部 (等待审核公开)	Q

5.3 关于二氧化碳捕集环节环境风险的说明

二氧化碳的捕集分离技术有化学吸收法、物理吸收法、膜分离法等。目前较为常用的是化学吸收法和物理吸收法，分别以乙醇胺（MEA）、甲基二乙醇胺（MDEA）等乙醇胺类吸收剂和低温甲醇洗工艺应用最为广泛，其中，我国华能北京高碑店电厂和胜利油田电厂等捕集示范项目采用胺类吸收剂；神华煤制油捕集环节采用低温甲醇洗工艺。

化学吸收法是捕集和分离的主要方法，其中以胺类吸收剂使用为主，受到较多关注的是乙醇胺（Ethanolamine, MEA），二乙醇胺（Diethanolamine, DEA）和甲基二乙醇胺（Methyldiethanolamine, MDEA）。胺类吸收剂具有显著的优势，表现在二氧化碳捕集率高、二氧化碳低分压下的反应速率大、低成本、溶解度高等。然而，在重复连续运行中暴露出的吸收剂降解现象已成为二氧化碳化学吸收法面临的巨大挑战。降解反应分为四类：第一类是氧化降解反应，在吸收液中 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 NO_x 的催化作用下与溶解氧发生的反应；第二类是氨基甲酸根二聚反应，发生在高温的再生塔内；第三类是亚硝胺的生成反应；第四类是热稳定盐的生成反应。降解产物包括氨气、醛类、酰胺、亚硝胺等。

低温甲醇洗工艺也被广泛用于其它的生产过程，但甲醇消耗大，环境风险较高。

捕集过程中，吸收剂及其降解物、催化剂等均有可能对环境产生不利影响，本指南中根据环境风险源的定义将其称为环境风险物质。因此，捕集环节的主要环境风险表现为捕集设备正常运行或失效引起的环境风险物质本身及挥发和降解过程产生的污染物排放。

5.4 关于二氧化碳运输环节环境风险的说明

二氧化碳运输包括管道运输、船舶运输、槽车运输三类。槽车运输规模较小，与管道和船舶运输相比成本较高，一般不用于大规模运输。对于大量封存和中等距离运输的情况，采用管道运输二氧化碳是最安全和经济的运输方式。美国已经有超过 30 年利用管道输送二氧化碳提高石油采收率（Enhanced Oil Recovery, EOR）的经验，管道总长超过 2500 公里，然而，我国二氧化碳管道运输刚刚起步，面临着诸多挑战。

槽车运输和船舶运输，属于点状运输，不连续，与一般气态和液体危险物质的运输状态相同，环境风险主要来源于二氧化碳贮存设备破裂导致的影响，对环境的影响较小。因此，运输过程的环境风险主要关注管道运输过程中管道应力腐蚀开裂、腐蚀穿孔、管材缺陷或焊口缺陷、第三方破坏、自然灾害及误操作等导致的二氧化碳泄漏事故、二氧化碳和/或其它物质泄漏，及其对人类健康、动植物、地下水、地表水、大气等的不利影响。

此外，杂质和水的存在也会影响管道的腐蚀速率。在二氧化碳泄漏和扩散中，杂质可能

影响到物相、温度和压力，同时，由于扩散的二氧化碳可能会产生相变，从而导致在管道周围形成干冰，堵塞原有的泄漏通道，进一步导致管道的破裂和二氧化碳的大量快速泄漏。

5.5 关于二氧化碳利用与封存环节环境风险的说明

二氧化碳利用与封存的环境风险评估是当前 CCUS 领域研究的热点，直接关系到这项技术对减缓全球气候变化的贡献。关注的焦点是二氧化碳泄漏。二氧化碳可能的泄漏通道(参见图 1)有以下几种：

- ①二氧化碳突破毛细管压力后，在盖层中甚至上覆地层中的泄漏；
- ②通过断层的泄漏；
- ③通过盖层中局部缺陷处的泄漏；
- ④储层压力增加及断层渗透率增加导致的二氧化碳泄漏；
- ⑤通过没有封堵好的废弃井泄漏；
- ⑥溶解到地下水中的二氧化碳泄漏到储层外；
- ⑦溶解到地下水中的二氧化碳沿着倾斜的地层泄漏到地表。

对 IPCC（2005）报告中指出的上述可能泄漏途径作进一步分析归纳，实际可能发生的泄漏途径主要有以下 4 类：

- （1）沿着灌注井或废弃井的泄漏；
- （2）沿着断层或裂缝的泄漏；
- （3）沿着储层的泄漏；
- （4）通过盖层孔隙的泄漏。

其中，（1）和（2）可以在短时间内发生；（3）和（4）的发生可能需要上万年的时间。因此，在环境风险评估情景设计时，必须考虑各种可能泄漏途径需要的时间尺度，而且必须同时考虑到与各个情景对应的浮力、压力等圈闭要素。

二氧化碳泄漏带来的环境风险分为全球环境风险和局部环境风险。全球环境风险主要是指封存的二氧化碳泄漏到大气中，释放出的二氧化碳可能引发显著的气候变化。局部环境风险主要是指对局部地区环境甚至人体健康产生的不利影响。

（1）全球环境风险

大量二氧化碳泄漏将阻碍应对气候变化进程，弱化 CCUS 的贡献。有观点认为：即使每年的泄漏率为 1%，100 年后泄漏的二氧化碳排放将为封存量的 37%，从减缓气候变化的角度来看，这是不被接受的。因此，如果被封存的二氧化碳不能稳定地封存在储层中，CCUS

10

表 2 二氧化碳临界值规定

	极限值	暴露时限	国家/单位
职业暴露极限时间 8 小时/天（工人）	0.5%	8 小时/天	欧洲、美国、加拿大
短期暴露极限（工人）	3%	15 分钟	美国
立即危及生命和健康的影响	4%	-	美国
不可逆效应（风险评估）	5%	30 分钟	法国
一次致命影响（风险评估）	10%	30 分钟	法国
显著致命影响（风险评估）	20%	30 分钟	法国

2) 对动物的影响

地面动物：二氧化碳对人类的暴露临界值基本适用于地面动物²。一般来说，二氧化碳浓度超过 5%会导致动物呼吸道中毒³。

土壤动物：当二氧化碳浓度达到 2%时，开始出现负面的生理效应，当二氧化碳浓度大约为 15%时，影响可能会是致命的⁴。

3) 对植物的影响

土壤或空气中的二氧化碳浓度显著增加会对植被产生有害的生理影响，二氧化碳暴露影响的临界值约为 20~30%⁵。根据实验结果和二氧化碳暴露程度，二氧化碳浓度变化对植物的影响范围非常宽，从植被多样性或组成的细微变化，直至植物灭绝。

4) 对微生物的影响

二氧化碳浓度高于 10%时，有些微生物会死亡，二氧化碳浓度达到 50%时通常会有显著的抑制或致命影响⁶。二氧化碳暴露还可能会影响微生物活动和微生物总数⁷。由于二氧化碳暴露，微生物种群可能会受到生物地球化学变化的影响，可能会改变营养物质可用性（不

²US Environmental Protection Agency.2008.Vulnerability evaluation framework for geologic sequestration of carbon dioxide.US Environmental Protection Agency, pp 85.

³Sage F. 2002. How Terrestrial Organisms Sense, Signal, and Respond to Carbon Dioxide. Integrative and Comparative Biology 42(3):469-480.

⁴US Environmental Protection Agency. 2008. Vulnerability evaluation framework for geologic sequestration of carbon dioxide. US Environmental Protection Agency, pp 85.

⁵ IEA Greenhouse Gas R&D Programme. 2007. Study of Potential Impacts of Leaks From Onshore CO₂ Storage Projects on Terrestrial Ecosystems, 2007/3, July 2007.

⁶Hepple R.P., 2005.Human Health and Ecological Risks of Carbon Dioxide. In Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations – Results from the CO₂ Capture Project, Vol. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, Benson S.M., Oldenburg C., Hoverstein M., Imbus S. (eds). Elsevier Publishing: Oxford; 1143–1172

⁷Kruger M., West J., Frerichs J., et al., 2009. Ecosystem effects of elevated CO₂ concentrations on microbial populations at a terrestrial CO₂ vent at Laacher See, Germany. Energy Procedia 1: 1933-1939.

包括氮)，并会影响整个生态系统⁸。

5) 对地下水的影响

二氧化碳会溶于水，当浓度为 2% 左右时，呈现低酸性；当超过 2%，酸性增加，具有一定的腐蚀性；当超过 6%，酸性增加具有腐蚀性，并失去灌溉作用。酸性增加将溶解一些矿物质，并析出一些金属元素，进而改变水质。

由于捕集的二氧化碳可能含有硫化氢、二氧化硫、氮氧化物、Hg 等杂质，这些杂质可能会随着二氧化碳一起注入地下。此外，二氧化碳泄漏可能会成为地下自然存在的硫化氢、氨、甲烷等气体泄漏的载体。二氧化碳所携带杂质和地下自然存在气体的泄漏，可能会通过不同暴露途径（吸入、摄入、皮肤接触、表面接触）影响环境风险受体，导致非常广泛的影响，如癌症、生育能力下降、畸形等。

因此，美国、欧盟、澳大利亚等国家针对 CCUS 技术的环境影响与环境风险从国家层面制定了环境管理规定，澳大利亚环境保护和遗产委员会 2009 年制定了《Environmental Guidelines for Carbon Dioxide Capture and Geological Storage - 2009》；欧盟 2009 年制定了《Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the council on the geological storage of carbon dioxide》，其目的是使二氧化碳得到永久封存，使之不可能地，并防止和消除对环境和人体健康产生的不利影响和风险；美国 EPA 制定了《Federal Requirements Under the Underground Injection Control (UIC) Program for Carbon Dioxide (CO₂) Geologic Sequestration (GS) Wells》，该法案于 2011 年 1 月 10 日正式生效，其目标是保护地下饮用水资源，针对二氧化碳地质封存定义了一个新的等级。

然而，我国作为世界第二大 CCUS 国家，其环境管理已滞后于项目的发展，主要表现为：

(1) CCUS 项目性质定位缺乏明确的规定。二氧化碳排放在应对气候变化背景下，属于需要减排的温室气体；但同时，二氧化碳也是食品制造业、化工生产的原料，属于生产性资源；然而，二氧化碳气体本身没有毒性，但是超过正常浓度范围也将对人体健康、生态环境造成不可接受的影响，甚至是窒息或者死亡，则二氧化碳气体属于危险气体还是其他？所有这些，我国目前没有明确的规定，但是二氧化碳的这些外在属性，直接决定着 CCUS 试验示范项目的管理“归位”和产业定位。

⁸ IEA Greenhouse Gas R&D Programme. 2007. Study of Potential Impacts of Leaks From Onshore CO₂ Storage Projects on Terrestrial Ecosystems, 2007/3, July 2007.

(2) 我国现在还没有适用于 CCUS 的环境影响评价导则。二氧化碳属性, CCUS 项目和环境风险特点与一般建设项目具有很大的不同, 导致了目前现行的环境影响评价导则很难直接套用在 CCUS 项目。针对 CCUS 项目, 如果缺乏环境管理, 一方面, 企业按照较高或较低的标准建设, 成本进一步提高或达不到环保和风险控制标准, 难以保证二氧化碳捕集、利用与封存不会对生态环境产生不利影响; 另一方面, 对项目审批和实施带来不利影响, 不利于管理部门监管。

在针对示范项目的调研与交流中, 上述问题已成为当前示范项目面临的突出问题之一, 并影响了示范项目的发展。

5.6 关于二氧化碳利用与封存环节环境风险的影响界定说明

二氧化碳捕集、利用与封存的环境风险受体主要为人群、动植物等生命体及其与之密切相关的地表水、地下水、土壤、大气等环境介质。其中, 二氧化碳捕集、利用与封存对人群、动植物等生命体的影响很大程度上取决于对地表水、地下水、土壤、大气等环境介质的影响。因此, 对环境风险受体的影响界定需要综合考虑对大气、地表水、地下水、土壤等环境介质环境质量的影响, 人群、动植物等生命体的阈值, 以及受影响的范围。

6 指南实施建议

(1) 《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》应与我国关于 CCUS 技术路线图及项目发展等相关规划结合。

(2) 根据将来 CCUS 技术、项目和环境风险评估方法等的实际发展状况, 适时修订本指南。