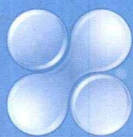


# 中国二氧化碳地质封存 环境风险评估

中国二氧化碳地质封存环境风险研究组 著



化学工业出版社



# 中国二氧化碳地质封存 环境风险评估



中国二氧化碳地质封存环境风险研究组 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《中国二氧化碳地质封存环境风险评估》共分8章。第1章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存的缘起和基本原理；第2章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存的技术特征；第3章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存在全球中长期减缓气候变化中的作用，即大规模实施和推广二氧化碳捕集、利用与封存的重要意义，以及相关政策法规；第4章主要介绍中国的二氧化碳捕集、利用与封存的研究、管理和实践进展；第5章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存可能存在的环境风险和环境影响；第6章精选国际和国内二氧化碳捕集、利用与封存项目的典型案例，分析其运行特征和环境评估；第7章主要介绍《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》的核心内容，当前存在的问题和不足，以及下一步的重点研究方向；第8章主要介绍中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训第一期（呼和浩特）的基本情况以及现场获取的问卷调查分析主要结果。本书强调基本原理和技术实践的结合，期望能体现二氧化碳捕集、利用与封存相关环境风险评估的系统性、完整性和全面性，并能涵盖技术的科学性、前沿性和交叉性。

《中国二氧化碳地质封存环境风险评估》可作为从事二氧化碳捕集、利用与封存、环境评估等相关专业技术人员的培训教材，也可供对二氧化碳捕集、利用与封存、环境变化以及应对气候变化等感兴趣的科技人员参考。

#### 图书在版编目（CIP）数据

中国二氧化碳地质封存环境风险评估 / 中国二氧化碳地质封存环境风险研究组著. —北京：化学工业出版社，2018.5

ISBN 978-7-122-31990-6

I. ①中… II. ①中… III. ①二氧化碳-保藏-地质环境-风险评估-研究-中国 IV. ①O613.71②X83

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第080412号

---

责任编辑：王淑燕 宋湘玲

加工编辑：丁文璇

责任校对：宋 玮

装帧设计：王晓宇

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号  
邮政编码100011）

印 装：北京东方宝隆印刷有限公司

850mm×1168mm 1/32 印张6¼ 字数119千字

2018年7月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：68.00元

版权所有 违者必究



# 中国二氧化碳地质封存环境风险研究组

## 组长

- 蔡博峰 环境保护部环境规划院  
李琦 中国科学院武汉岩土力学研究所

## 撰写人员（按姓氏拼音字母排序）

- 蔡博峰 环境保护部环境规划院  
曹丽斌 环境保护部环境规划院  
陈帆 环境保护部环境工程评估中心  
崔青 环境保护部环境工程评估中心  
胡丽莎 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心  
李鹏春 中国科学院南海海洋研究所  
李琦 中国科学院武汉岩土力学研究所  
李清 中国石油吉林油田分公司二氧化碳捕集埋存与提高采收率开发公司  
李义连 中国地质大学（武汉）  
林干果 华北电力大学  
刘桂臻 中国科学院武汉岩土力学研究所  
柳朝晖 华中科技大学

- 陆诗建 中石化节能环保工程科技有限公司  
庞凌云 北京中碳科创能源科技有限公司  
彭 勃 中国石油大学(北京)  
王永胜 神华鄂尔多斯煤制油分公司  
魏 凤 中国科学院武汉文献情报中心  
闫 晗 中国人民大学  
杨国栋 武汉科技大学  
张 徽 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心  
张力为 中国科学院武汉岩土力学研究所  
张 贤 中国 21 世纪议程管理中心  
张战胜 环境保护部环境规划院  
仲 平 中国 21 世纪议程管理中心  
周 来 中国矿业大学  
祝秀莲 环境保护部环境工程评估中心

#### 构图与绘图人员(按姓氏拼音字母排序)

- 蔡博峰 环境保护部环境规划院  
谷莹莹 北京交通大学  
李 琦 中国科学院武汉岩土力学研究所  
刘桂臻 中国科学院武汉岩土力学研究所

## 各章节撰写人员

章 节	作 者
1	什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS)
1.1	CCUS 的缘起
1.2	CO <sub>2</sub> 地质封存基本原理
1.2.1	CO <sub>2</sub> 相态
1.2.2	CO <sub>2</sub> 密度
1.2.3	CO <sub>2</sub> 储层和盖层
1.2.4	CO <sub>2</sub> 地质封存机理
2	地质封存与利用主要技术
2.1	二氧化碳驱提高石油采收率
2.2	二氧化碳驱替煤层气
2.3	二氧化碳增强地热系统
2.4	二氧化碳增强页岩气开采
2.5	二氧化碳强化天然气开采
2.6	二氧化碳强化深部咸水开采
2.7	二氧化碳铀矿地浸开采
2.8	生物质二氧化碳地质封存
3	全球 CCUS 现状
3.1	CCUS 在全球应对气候变化中的 作用
3.2	CCUS 全球项目分布
3.3	全球 CCUS 行业类型

	章 节	作 者
3.4	CCUS 相关组织、技术规范和政策法规	魏 凤
3.5	CCUS 国际标准	彭 勃, 蔡博峰
4	中国 CCUS 现状	
4.1	中国 CCUS 相关的国家和地方政策	李 琦
4.2	CCUS 在中国温室气体减排中的贡献	张 贤
4.3	中国 CCUS 国家路线图	仲 平
4.4	中国 CCUS 项目分布	刘桂臻
5	CCUS 的环境风险和环境影响	
5.1	CCUS 的环境风险	李 琦
5.2	CCUS 的环境影响	蔡博峰
5.3	CCUS 环境风险评估方法	李 琦
6	案例分析	
6.1	国际案例	
6.1.1	加拿大 Weyburn 项目	李 琦
6.1.2	澳大利亚 Gorgon 项目	李 琦
6.1.3	美国 Decatur 项目	张力为
6.1.4	德国 CLEAN 项目	杨国栋
6.2	中国案例	
6.2.1	中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳地质封存示范工程	王永胜, 张 徽
6.2.2	中国石油吉林油田二氧化碳驱提高石油采收率项目	李 清



	章 节	作 者
6.2.3	延长石油二氧化碳驱提高石油采收率项目	林干果
6.2.4	中联煤二氧化碳驱替煤层气先导性试验	周 来
7	中国 CCUS 环境风险评估技术指南解读	
7.1	出台背景	张战胜
7.2	《指南》与现行的法律法规的关系	蔡博峰
7.3	《指南》内容解读	蔡博峰, 陈 帆 崔 青, 祝秀莲
7.3.1	评估流程	蔡博峰, 陈 帆 崔 青, 祝秀莲
7.3.2	评估范围	李 琦, 蔡博峰
7.3.3	风险源识别及风险受体	蔡博峰
7.3.4	地质利用与封存风险源强	张 徽, 胡丽莎
7.3.5	推荐评估方法	李 琦
7.3.6	风险管理	蔡博峰
7.4	《指南》应用案例	李 琦, 刘桂臻
7.4.1	基于 FEP 的环境风险识别	李 琦
7.4.2	环境风险矩阵	李 琦
7.5	《指南》完善方向	蔡博峰, 陈 帆 崔 青, 祝秀莲
8	中国 CCUS 环境风险评估培训第一期(呼和浩特)	
8.1	第一期培训基本情况	曹丽斌



章 节		作 者
8.2	第一期培训问卷调查	闫 晗 曹丽斌 蔡博峰
8.2.1	调查样本	
8.2.2	CCUS 认知程度	
8.2.3	CCUS 大规模实施后对环境的负面影响程度	
8.2.4	CCUS 环境管理重要性分析	
8.2.5	CCUS 环境风险评估指南程序认可度分析	
8.2.6	地质利用与封存环境风险评估范围认可度分析	
8.2.7	CCUS 环境风险评估指标重要性分析	
8.2.8	主要结论	

### 全书统稿和校对（按姓氏拼音字母排序）

- 蔡博峰 环境保护部环境规划院
- 曹丽斌 环境保护部环境规划院
- 李鹏春 中国科学院南海海洋研究所
- 李 琦 中国科学院武汉岩土力学研究所
- 李 清 中国石油吉林油田分公司二氧化碳捕集埋存与提高采收率开发公司
- 林干果 华北电力大学
- 庞凌云 北京中碳科创能源科技有限公司
- 魏 凤 中国科学院武汉文献情报中心
- 杨国栋 武汉科技大学
- 张力为 中国科学院武汉岩土力学研究所



# 前言

FOREWORD

二氧化碳捕集、利用与封存是以减少人为二氧化碳排放为目的的技术体系，通过该技术有望实现化石能源利用的近零排放，因此受到国际社会特别是发达国家的重视。

从国际经验看，环境安全问题始终是二氧化碳捕集、利用与封存技术应用中的关注焦点。中国在示范项目的选址、建设、运营以及地质利用与封存场地关闭及后续的环境风险评估和监控等方面均缺乏相应的标准以及法律法规。2013年环境保护部印发的《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）中提出“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（试行）》制定工作，并于2016年6月21日正式发布。

为了积极配合《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》的推广和应用，由环境保护部科技标准司气候处组织编写了《中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材》，于2017年正式出版，作为第一期（呼和浩特）培训会的正式教材，受到了各界的广泛好评，但同时也发现了很多问题和不足。因而，环境保

护部环境规划院再次组织了国内 19 家单位的 26 位科学工作者，进行了修订，最大程度地增强教材的科学性、严谨性，并能反映国际、国内的最新进展，同时保持第一稿深入浅出、生动形象的编写风格，以便于非二氧化碳捕集、利用与封存领域的读者能较为轻松、快速地阅读和参考。

由于编著人员水平有限，书中难免存在疏漏，敬请读者不吝批评指正，也欢迎读者将自己的研究成果和实践经验分享出来，作为我们以后教材的内容（联系邮箱：[ccep@caep.org.cn](mailto:ccep@caep.org.cn)）。

著者

2018 年 3 月





# 目 录

CONTENTS

## 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) … 001

- 1.1 CCUS的缘起 …………… 002
- 1.2 CO<sub>2</sub>地质封存基本原理 …………… 003
  - 1.2.1 CO<sub>2</sub>相态 …………… 003
  - 1.2.2 CO<sub>2</sub>密度 …………… 004
  - 1.2.3 CO<sub>2</sub>储层和盖层 …………… 004
  - 1.2.4 CO<sub>2</sub>地质封存机理 …………… 006

## 2 地质封存与利用主要技术 …………… 011

- 2.1 二氧化碳驱提高石油采收率 (CO<sub>2</sub>-EOR) …………… 012
- 2.2 二氧化碳驱替煤层气 (CO<sub>2</sub>-ECBM) …………… 014
- 2.3 二氧化碳增强地热系统 (CO<sub>2</sub>-EGS) …………… 016
- 2.4 二氧化碳增强页岩气开采 (CO<sub>2</sub>-ESGR) …………… 017
- 2.5 二氧化碳强化天然气开采 (CO<sub>2</sub>-EGR) …………… 018
- 2.6 二氧化碳强化深部咸水开采 (CO<sub>2</sub>-EWR) …………… 020
- 2.7 二氧化碳铀矿地浸开采 (CO<sub>2</sub>-EUL) …………… 021
- 2.8 生物质二氧化碳地质封存 (CO<sub>2</sub>-BECCS) …………… 022

## 3 全球CCUS现状 …………… 025

- 3.1 CCUS在全球应对气候变化中的作用 …………… 026

3.2	CCUS全球项目分布 .....	034
3.3	全球CCUS行业类型 .....	037
3.4	CCUS相关组织、技术规范和政策法规 .....	039
3.4.1	技术规范 .....	040
3.4.2	政策法规 .....	049
3.5	CCUS国际标准 .....	052

## 4 中国CCUS现状 ..... 055

4.1	中国CCUS相关的国家和地方政策 .....	056
4.2	CCUS在中国温室气体减排中的贡献 .....	063
4.3	中国CCUS国家路线图 .....	064
4.4	中国CCUS项目分布 .....	066

## 5 CCUS的环境风险和环境影响 ..... 071

5.1	CCUS的环境风险 .....	072
5.2	CCUS的环境影响 .....	077
5.3	CCUS环境风险评估方法 .....	080

## 6 案例分析 ..... 083

6.1	国际案例 .....	084
6.1.1	加拿大Weyburn项目 .....	084
6.1.2	澳大利亚Gorgon项目 .....	085
6.1.3	美国Decatur项目 .....	088
6.1.4	德国CLEAN项目 .....	089
6.2	中国案例 .....	090
6.2.1	中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳地质封存示范工程 .....	090

6.2.2	中国石油吉林油田二氧化碳驱提高石油采收率项目	095
6.2.3	延长石油二氧化碳驱提高石油采收率项目	099
6.2.4	中联煤二氧化碳驱替煤层气先导性试验	102

## 7 中国CCUS环境风险评估技术指南解读 ..... 105

7.1	出台背景	106
7.2	《指南》与现行的法律法规的关系	108
7.3	《指南》内容解读	111
7.3.1	评估流程	111
7.3.2	评估范围	112
7.3.3	风险源识别及风险受体	118
7.3.4	地质利用与封存风险源强	122
7.3.5	推荐评估方法	127
7.3.6	风险管理	129
7.4	《指南》应用案例	132
7.4.1	基于FEP的环境风险识别	132
7.4.2	环境风险矩阵	133
7.5	《指南》完善方向	136

## 8 中国CCUS环境风险评估培训第一期 (呼和浩特) ..... 139

8.1	第一期培训基本情况	140
8.2	第一期培训问卷调查	142
8.2.1	调查样本	142
8.2.2	CCUS认知程度	143
8.2.3	CCUS大规模实施后对环境的负面影响	144



8.2.4	CCUS环境管理重要性分析 .....	146
8.2.5	CCUS环境风险评估指南程序认可度分析 .....	147
8.2.6	地质利用与封存环境风险评估范围认可度分析 .....	148
8.2.7	CCUS环境风险评估指标重要性分析 .....	150
8.2.8	主要结论 .....	150

附录1	主要术语解释 .....	153
-----	--------------	-----

附录2	二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南 .....	155
-----	------------------------------	-----

参考文献	.....	171
------	-------	-----



# 表目录

表 3-1	CCUS 国际组织 .....	039
表 3-2	全球 CCUS 相关主要技术规范 .....	041
表 3-3	CCUS 相关法规 .....	050
表 4-1	中国出台的 CCUS 相关政策 .....	057
表 4-2	地方政府出台 CCUS 的相关政策 .....	060
表 4-3	中国主要 CCUS 示范工程基本情况一览表 .....	067
表 5-1	不同二氧化碳浓度对生态系统和生物的影响 .....	078
表 5-2	国际上典型的 CCUS 环境风险评价方法 .....	081
表 7-1	现行环境影响评价技术导则对二氧化碳地质封存与 利用项目的适用性分析 .....	108
表 7-2	中国 CCUS 相关的法律法规 .....	109
表 7-3	捕集环节风险源识别 .....	118
表 7-4	捕集环节风险受体 .....	119
表 7-5	地质封存与利用环境风险因素识别 .....	120
表 7-6	地质封存影响受体的识别 .....	122
表 7-7	封存项目的风险源强关键影响因子指标体系 .....	123
表 7-8	全球对 CO <sub>2</sub> 泄漏源强的统计一览表 .....	124
表 7-9	地质封存影响概率 .....	128
表 7-10	对环境风险受体影响的界定 .....	128
表 7-11	环境风险防范措施 .....	129

表 7-12 环境风险事件的应急措施 .....	130
表 7-13 环境风险评估矩阵 .....	133
表 8-1 调查样本基本情况及构成 .....	142
表 1 可能性界定 .....	166
表 2 对环境风险受体影响的界定 .....	167
表 3 环境风险评估矩阵 .....	168
表 4 环境风险防范措施 .....	168
表 5 环境风险事件的应急措施 .....	169