

编者按:

二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)是全球应对气候变化和减缓二氧化碳排放的重要技术,但由于其前沿的技术体系和巨大的工程规模,引发了国际社会和公众对于CCUS项目环境影响和环境风险的担心,甚至反对。中国环境保护部在2016年6月正式发布了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》(以下简称《指南》),以引导和规范中国CCUS环境影响和环境风险的评估、管理和防范。作为中国第1个,也是全球发展中国家第1个CCUS环境领域的技术文件,《指南》出台后引发了政府部门、科研机构和企业等各界的广泛关注和热烈讨论。环境保护部环境规划院作为指南的起草单位之一,在指南发布1年后,面向全社会征集针对指南的理论探讨和实践应用的研究成果,旨在发现问题,进一步完善《指南》并推进中国CCUS相关工作,并与《环境工程》期刊编辑部联合策划、精心选择了9篇优秀论文,其中包括实际应用、技术分析、方法研究和制度设计等,供决策者、研究者、CCUS项目实践者和社会公众参考,也试图将其有价值的内容纳入到《指南》下一步的修改完善中。

## 中国碳封存项目的环境应急管理研究<sup>\*</sup>

周颖<sup>1</sup> 蔡博峰<sup>1</sup> 曹丽斌<sup>1</sup> 王保登<sup>2</sup> 赵兴雷<sup>2</sup> 王永胜<sup>3</sup> 李琦<sup>4</sup> 马劲风<sup>5</sup> 胡丽莎<sup>6</sup>

(1. 环境保护部环境规划院 气候变化与环境政策研究中心,北京 100012; 2. 北京低碳清洁能源研究所工艺工程研发中心,北京 102209; 3. 神华鄂尔多斯煤制油分公司,内蒙古 鄂尔多斯 017209; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,武汉 430070; 5. 西北大学 地质学系 二氧化碳捕集与封存技术国家地方联合工程研究中心,西安 710069; 6. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心 河北 保定 071051)

摘要:碳封存是在当前条件下快速将大气中CO<sub>2</sub>浓度控制在450 mg/L以下的一种重要减排方式。我国已经开展了多项示范项目,但当前的环境应急管理政策并不能对其进行有效监管。主要从信息上报制度、环境应急预案编制与备案制度、监测管理和资金保障制度4方面进行分析,并针对碳封存项目环境应急管理的几个关键问题进行分析,提出了完善碳封存环境应急管理政策的相关建议。

关键词:指南;环境应急;碳封存;政策

DOI: 10. 13205/j. hjgc. 201802001

### STUDY ON ENVIRONMENTAL EMERGENCY MANAGEMENT OF CHINA'S CARBON SEQUESTRATION PROJECTS

ZHOU Ying<sup>1</sup>, CAI Bo-feng<sup>1</sup>, CAO Li-bin<sup>1</sup>, WANG Bao-deng<sup>2</sup>, ZHAO Xing-lei<sup>2</sup>, WANG Yong-sheng<sup>3</sup>,  
LI Qi<sup>4</sup>, MA Jin-feng<sup>5</sup>, HU Li-sha<sup>6</sup>

(1. Center for Climate and Environmental Policy, Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China, Beijing 100012, China; 2. Process & Engineering Center, National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102209, China; 3. Shenhua Ordos Coal Liquefaction Corporation, Ordos 017209, China; 4. China State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China; 5. National & Local Joint Engineering Research Center of Carbon Capture and Storage Technology, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 6. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

<sup>\*</sup> 中国清洁发展机制基金项目“大气污染防治行动计划对CO<sub>2</sub>排放的影响研究”(2014078)。

收稿日期:2017-08-01

**Abstract:** Geological sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is one of the most important way of CO<sub>2</sub> emission reduction to maintain the CO<sub>2</sub> concentration below 450 mg/L under current conditions. In China, a number of pilot projects of carbon geological sequestration have been implemented, yet the current environmental emergency management policy cannot take account of the specialty of these projects and assume effective regulation. This paper analysed the environment emergency management policy for projects of carbon geological sequestration in the four aspects, information reporting system, preparation of environmental emergency plan and record system, monitoring management system, and fund guarantee system, namely. This paper discussed several key issues in environmental emergency management of carbon geological sequestration projects and put forward some policy proposes.

**Keywords:** technical guidelines; environment emergency; carbon geological sequestration; environmental policy

## 0 引言

2016年环境保护部发布《关于发布〈二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)〉的通知》(环发科技[2016]64号,以下简称《指南》),《指南》明确了二氧化碳捕集、利用与封存(carbon dioxide capture, utilization and storage, CCUS)环境风险评估的流程,提出环境风险防范措施和环境风险事件的应急措施,对于加强CO<sub>2</sub>捕集、运输、利用和封存全过程的环境风险管理具有重要意义,成为发展中国家的第1个CCUS环境风险评估技术文件。在《指南》的“7、环境风险管理”中列出了一系列环境风险防范措施和环境风险事件的应急措施,但该部分内容相对宽泛,相较于碳封存项目环境管理要求还存在很多空白。

我国关于环境应急管理的制度体系正在逐步完善,在环境应急管理领域中,已有的文件包括国务院发布的《国家突发环境事件应急预案》、《关于加强环境应急管理工作的意见》(环发[2009]130号)、《突发环境事件应急预案管理暂行办法》(环发[2010]113号)、《突发环境事件信息报告办法》(部令第17号)、《突发环境事件调查处理办法》(部令第32号)、《突发环境事件应急管理办法》(部令第34号)、《企业事业单位突发环境事件应急预案备案管理办法》(环发[2015]4号)和HJ 589—2010《突发环境事件应急监测技术规范》等,基本覆盖了环境突发事件应急的总则、报告、预案、调查处理和应急监测等方面内容。

但是分析这些制度的监管对象就会发现,在《突发环境事件应急管理办法》(部令第34号)、《突发环境事件调查处理办法》(部令第32号)和HJ 589—2010中,明确说明其针对的监管对象是污染物、危险化学品、危险废物或放射性物质等有毒有害物质中的一种或几种。无论是低浓度还是高浓度的CO<sub>2</sub>,在我

国都不属于污染物的范围,更不属于危险废物范畴。因此,现有的大部分应急管理制度中,碳封存项目不是监管的主体和对象,更无法体现碳封存项目的特殊性。

碳封存在全球范围内都处于探索阶段,在环境应急管理方面更是刚刚起步。为了加强对碳封存项目的环境应急管理工作,本文结合碳封存过程的特殊性,基于我国已有的环境应急管理体系,借鉴国际碳封存先进环境管理制度,提出了我国碳封存项目的环境应急管理建议。

## 1 环境应急管理重点内容

CO<sub>2</sub>在常温常压下是一种无色无味气体,本身无毒性,但如果在碳封存过程中或封井后产生泄漏,大量CO<sub>2</sub>溶解于水体和土壤,会使其酸化,对作物生长和环境造成严重影响。如果是液态CO<sub>2</sub>泄漏,尤其是瞬时泄漏容易造成低温灼伤,在通风状况不好的情况下则会沉积于地表地势低洼处,造成人员窒息,也可能由于体积的瞬时增加而引起爆炸。为了在碳封存项目发生突发事件时能够及时准确应对,本文主要从环境应急管理的以下几方面进行探讨。

### 1.1 信息上报制度

碳封存项目通常发生在几千米深的地下,如果环境保护部门不能掌握封存区域地下的详细信息,不仅对碳封存项目可能产生的环境风险也不能深入了解,更不可能有针对性地进行指导和管理。对于碳封存项目方来说,必须完全掌握封存区域以往的生产、开采、注入等相关地质活动,否则很难准确模拟该区域内可能的泄漏途径以及相关环境风险。

美国环境保护署(EPA)和欧盟都要求碳封存项目在实施前必须申请许可证,并提交碳封存项目可能影响范围内的下列信息:1)详细的地表信息,例如敏感人群、建筑、道路、管网等;2)详细的地质信息,例如当地历史地震信息、储层和盖层水文地质信息、储

层和盖层的地质数据等; 3) 所有穿透储层或盖层的井口信息, 包括所有生产井、注入井、废弃井以及其他相关井口的详细信息; 4) 地形图和地层剖面图, 尤其注明所有地下水、喷泉和水井的范围和流动方向; 5) 相关地层的基准物理化学信息; 6) 碳封存运行过程的计划和重要信息参数; 7) 监测方案; 8) 环境应急预案; 9) 环境管理部门要求的其他相关信息。同时环境管理部门也会向新建的碳封存项目公开其影响区域内其他地质活动的以上信息<sup>[1-5]</sup>。

我国在地下项目运行的环境管理仍存在大量空白, 建议环境管理部门: 1) 将碳封存项目纳入排污许可证制度的管理范围, 在项目实施前必须向所属地环境管理部门提交相关信息, 环境管理部门将所有信息整理归档后, 对其中部分信息在同行业企业内公开。2) 各地环境管理部门逐步收集以往井口(包括生产井、注入井、废弃井以及其他项目井口) 的相关信息, 并在未来同一区域的地下项目运行前, 为其提供井口详细信息作为参考。3) 收集当地地质资料信息, 确保一定范围内信息共享, 一是有助于类似项目可以相互参考, 获取更全面信息, 二是为环境风险管理和应急管理提供基础数据。

### 1.2 环境应急预案编制与备案制度

我国《突发环境事件应急管理办法》(部令第 34 号) 和《企业事业单位突发环境事件应急预案备案管理办法》(试行) 的内容主要针对和污染物、危险废物和物品以及有毒有害物质相关的企业, 碳封存项目并不在其管理范围内。而且碳封存项目相对于其他污染排放项目具有一定特殊性, 碳封存项目的环境应急预案编制主要受以下因素影响: 地质条件、地下饮用水源深度、注入深度、井眼完整性、人工压裂的存在、深度和年代信息、碳封存项目的运行条件和 CO<sub>2</sub> 属性、项目影响范围内的地表活动(如人口中心的存在、土地用途、公共给水系统)。

基于碳封存项目的不确定性和特殊性, 建议碳封存项目编制环境应急预案, 并报送到相关环境保护部门备案。碳封存项目的环境应急预案主要包括以下几个方面: 1) 如果项目运营方或环境管理部门发现注入的 CO<sub>2</sub> 流体和相应压力前沿可能会危及地下饮用水源, 那么项目方需要立即采取相应的环境应急管理措施; 2) 在对碳封存项目进行日常监测的基础上, 对注入井、监测井和已发现的可能泄漏点, 采取摄像头监控、人员定点值守等方法加强监控, 采取流动监

测的方式, 定期监测; 3) 结合当地地质特征和泄漏发生的可能位置, 明确不同的泄漏补救措施; 4) 环境管理部门预案和项目上报所有信息相结合, 及时评估碳封存项目的环境应急预案, 以确保其安全且全面; 5) 项目方应该定期审查, 并更新环境应急预案; 6) 《企业事业单位突发环境事件应急预案备案管理办法》(试行) 中要求的其他内容。

### 1.3 监测管理

我国对碳封存项目的监测没有明确要求, 但是为了及时了解 CO<sub>2</sub> 在地下的封存情况以及封存井的完整性, 在碳封存项目运行过程中和封存后进行检测和监测是必不可少的。总体来说, 碳封存项目的监测主要分为 3 个部分: 一是碳封存前, 对当地的地球化学主要指标、地表主要环境指标、土壤气体等进行本底监测; 二是在整个注入过程中, 多方位监测 CO<sub>2</sub> 羽流、注入压力、注入井的完整性、高于封闭带的地下水水质, 以及 CO<sub>2</sub> 羽流和压力前沿的位置; 三是在注入后进行监测和现场管理, 直到能够证实 CO<sub>2</sub> 羽流和压力前沿的运动已经停止, 并且注入流体不会再构成对地下饮用水源的风险<sup>[6]</sup>。

建议在碳封存项目开展前, 信息上报的内容中要明确提出监测方案, 主要包括以下内容: 1) 没有一项单一监测技术可以满足不同的监测需求, 应力求侧重于符合当地的系列监测方案; 2) 由于泄漏通道的未知性导致泄漏地点的不确定, 任何异常数据均可能预示着泄漏的存在, 因此为了尽可能地确保安全, IPCC、EPA 和欧盟都对监测内容有一定建议, 主要包括: CO<sub>2</sub> 羽流的物理化学特性分析的程序和频率; 内部和外部机械完整性测试、腐蚀监测、CO<sub>2</sub> 羽流和压力升高区域的位置确定、监测地下岩层中的地球化学变化、以及地表空气和土壤气体监测等<sup>[7]</sup>; 3) 本底监测、定期检查测试与监控计划, 并结合具体操作过程和监控数据, 对最新的审查区域进行重新评估; 4) 说明一旦发生泄漏事件, 碳封存项目方可迅速开展的应急监测方案。

### 1.4 资金保障制度

CO<sub>2</sub> 封存到地下后, 需要很长一段时间才能转化为稳定矿物成分, 逐步减少泄漏风险。由于封存时间非常长, 一旦碳封存项目出现突发环境事件, 需要及时提供大量资金开展补救工程、应急监测并赔偿损失等。为了确保项目在封存过程中、封井后的长时间内一旦发生环境突发事件, 都可以有明确的经济责任

人,并提供足额资金给予快速应对,建议环境管理部门制定研究碳封存项目的资金保障制度,主要包括以下内容:

1) 首先应该明确项目主体必须的经济成本,包括在 CO<sub>2</sub> 封存过程中和封存后,如果发生环境突发事件,需要投入的各项整改行为、注入井堵塞、注入后现场管理和封闭,应急补救和损害赔偿相应的成本。

2) 建立专门针对碳封存项目的经济责任保障制度。在美国,碳封存项目可以通过信托基金、担保保函、信用证、保险、自保、托管账户以及其他行政机关认同的金融工具,确保项目主体经济责任的履行。欧洲部分国家会投入部分特许税费。我国在这方面发展相对滞后,2017年6月对《环境污染强制责任保险管理办法》征求意见,但该管理办法还不能涵盖碳封存项目。

我国的环境污染强制责任保险制度才刚刚起步,为了提高中国碳封存项目的环境应急管理能力和建议近期:1) 将碳封存类项目纳入《国家污染强制责任保险管理办法》的强制投保范围内,明确项目主体的经济责任。通过保险公司承保前开展环境风险评估,封存过程中、封井后定期收集监测数据,并为项目定期进行环境风险评估,充分发挥保险制度的风险预防功能;2) 建议开发多种灵活的金融工具,经环境管理部门批准认可后,确保碳封存项目主体履行经济责任;3) 考虑碳封存项目对温室气体减排的重要意义,建议处于探索阶段的碳封存项目一旦出现突发事件,政府部门提供少量比例的财政补贴。

## 2 讨论

在制定碳封存项目的环境应急管理政策中,将会涉及到以下几个关键问题,需要在政策制定的过程中进行深入探讨,为碳封存项目的环境应急管理制度建立提供基础。

### 2.1 CO<sub>2</sub> 的定位问题

我国并没有把 CO<sub>2</sub> 列入污染物的名录里,因此环境应急管理过程中经常会存在各种障碍。而且在碳封存环境应急管理过程中还需考虑以下问题:1) 进行碳封存的 CO<sub>2</sub> 气流中可能包含一些有毒有害物质,或者由于 CO<sub>2</sub> 与地下水、地下岩层物质反应生成一些常规污染物和有毒有害物质(如放射性物质)等,因此不同的碳封存项目应该根据 CO<sub>2</sub> 气流来源、成分、封存的地质环境等,列出具体的污染因子和影响介质,分别予以探讨;2) 不同浓度的 CO<sub>2</sub> 可能会对生态环境和人体造成不同的影响,在实际过程中应该

区别对待。

### 2.2 注入后现场管理时间确定

国内对于碳封存项目的安全期限有不同的观点,国外一般集中在 20~50 年,欧盟要求的最短监测时间为 20 年,但其中法国和德国将这一年限提高到 30 年,美国则确定为 50 年,但美国各州在有明确证据的情况下可以进行调整。该年份与项目需要监测和投保的年限有直接关系,如果确定年份过长,将会明显增加项目方的运行维护成本和环境管理部门的管理成本,但是如果在不能明确确定 CO<sub>2</sub> 羽流不再泄漏的情况下,就直接缩短监测和投保年限,将会为碳封存项目带来风险隐患,因此该问题还应继续研究分析,建议环境管理部门审慎确定。

### 2.3 碳封存项目的模型问题

由于碳封存项目的特殊性,项目方和环境管理人员很难直接了解在碳封存过程中和封井后地下发生的情况。为了了解 CO<sub>2</sub> 在地质封存现场独特而复杂的运动方式,通常借助地面模型、CO<sub>2</sub> 羽流模型、地球化学模型和地质力学模型等分析碳封存现场的地质、水动力、地球化学、地热和岩土力学信息,通过现场认定的迭代过程、建模和对地质封存现场的监测来追踪 CO<sub>2</sub> 羽流和压力前沿,因此模型成为碳封存项目环境风险管理的重要组成部分。如果环境管理人员不能了解模型的相关信息,将很难确认模拟结果的准确性。因此项目方应按要求提交代码假设、相关公式和科学依据,以满足行政主管的要求,这也是项目运行方和环境管理部门共同存在的难点。

## 3 案例研究

我国还未对碳封存项目明确提出制定环境应急预案的要求,在此以中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳地质封存示范项目为例进行环境应急管理制度研究:

1) 基于封存场地的 DEM 模型,确定平板模型作为封存区 CO<sub>2</sub> 扩散模拟的模型,同时利用三维 Fluent 模型对复杂流场分布进行细致分析。

2) 将空间数据挖掘技术及模糊数学理论引入预警模型的构建中,结合监测对象的空间信息进行综合异常判断,检测识别警兆,确定异常等级,进而发布预警信息。

3) 在借鉴国外最新 CO<sub>2</sub> 应急处置预案流程的基础上,建立了完备的信息报告程序、预防与预警机制、应急响应程序、应急处置程序以及应急救援保障措施。

施。该方案既考虑 CO<sub>2</sub> 泄漏的特殊性,又兼顾了神华集团已有其他危化气体应急流程,其中针对 CO<sub>2</sub> 泄漏的特殊性内容主要包括:①泄漏监控。对注入井、监测井和已发现的可能泄漏点,采取摄像头监控、人员定点值守等方法加强监控,采取流动监测的方式,定期监测,在封存区选取6个固定监测点进行常态实时监测。完善安全管理规章制度,定期对泄漏源的管理岗位人员进行操作技能培训,定期对泄漏源的安全监测监控系统进行检测、检验,并进行经常性维护、保养,保证泄漏源的安全监测监控系统有效、可靠运行;②泄漏补救措施。泄漏补救措施需结合实际泄漏位置进行确定,若泄漏从注入井和监测井处发生,可采用更换注入井管道和堵塞器修复泄漏井,或者在井筒的后面挤压水泥或其他封堵材料,封堵管道或旁边水泥的泄漏点。若在注入过程中发生从断层、裂缝处的泄漏,则立即停止注入,加强工程处置措施。若封存期间发生此类型泄漏,可采取降低储层压力的方法,如从储层构造中移出地层水或其他流体,增加新的储层空间,分散储层压力,以及在泄漏点附近用抽水井横断泄漏部位等方式。

#### 4 结 论

《指南》的发布为碳封存的环境风险管理提供了政策依据,但我国在碳封存项目的环境应急管理方面仍有大量空白。国际标准化组织(ISO)正在研究制定的《ISO/TC265 Carbon Dioxide Capture, Transportation, and Geological Storage》近期即将发布,日本等国家的碳封存环境管理文件也在制定过程中。随着国际各国对碳封存环境应急管理制度的重视和完善,建议中国环境管理机构在国际标准基础上,基于现有环境管理制度基础,参照 SYT 6690—2008《井下作业井控技术规程》等近似行业标准,借鉴其他国家经验,尽快推进并完善符合我国国情的碳封存项目环境应急管理政策。

1) 尽快建立碳封存项目的信息上报制度。在当前的环境管理基础下,要全面了解相关信息是监管的基础。我国应该首先推动碳封存项目的信息上报系

统,这不仅对于环境监管具有重要意义,同时对于利益相关方进行碳封存的项目也将有重要参考价值。

2) 尽快制定碳封存的监测规范。国内外的碳封存项目时间都相对较短,碳封存项目在封井后的泄漏程度还具有很大不确定性,因此无论是从碳封存效果的检验角度,还是对环境风险的有效监控角度,都应尽快建立碳封存项目监测规范。

3) 明确碳封存项目的环境应急预案备案制度。目前,很多碳封存项目管理方已经编制了环境应急预案,但由于环境管理部门并没有明确的要求,因此没有备案。建议环境保护部门应尽快明确碳封存项目的环境应急预案编制要求以及备案制度。

4) 逐步完善碳封存项目的资金保障机制。建议在我国现有保险制度的基础上,不断创新符合我国国情的碳封存项目资金保障机制。

#### 参考文献

- [1] EPA. Geologic Sequestration of Carbon Dioxide Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Site Characterization Guidance [S]. <http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/glossary.cfm>. 2013-05.
- [2] EU. Directive 2009/31/EC on the geological storage of CO<sub>2</sub> [S]. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1503887185726&uri=CELEX:52015SC0246>. 2015.
- [3] 刘兰翠,李琦. 美国关于 CO<sub>2</sub> 地质封存井的要求[J]. 低碳世界, 2012, 20(1): 42-52.
- [4] 郝海青,焦传凯. 碳捕获与封存技术应用中的法律监管制度研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(23): 234-238.
- [5] 魏圣香,王慧. 欧盟的碳捕获与封存立法及其启示[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2014, 16(2): 6-13.
- [6] 蔡博峰. CO<sub>2</sub> 地质封存及其环境监测[J]. 环境经济, 2012(8): 44-49.
- [7] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL]. [2017-3-7]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

第一作者:周颖(1978-),女,博士,主要研究方向为气候变化与环境政策研究。zhouying@caep.org.cn

通信作者:李琦(1972-),男,博士,研究员,主要从事酸气固注和二氧化碳地质封存与利用方面的研究工作。qli@whrsm.ac.cn