

二氧化碳捕集、利用与封存环境风险问卷调查研究*

曹丽斌¹ 赵学涛¹ 蔡博峰¹ 谷莹莹² 周颖¹ 李琦³ 马劲风⁴ 胡丽莎⁵ 王永胜⁶ 赵兴雷⁷ 王保登⁷

(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. 北京交通大学,北京 100044;
3. 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; 4. 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; 5. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051;
6. 神华鄂尔多斯煤制油分公司,内蒙古 鄂尔多斯 017209; 7. 北京低碳清洁能源研究所 工艺工程研发中心,北京 102209)

摘要: 基于对从事应对气候变化的政府管理人员、科研人员和相关企业人员开展问卷调查,分析他们对CCUS技术和相关项目的环境安全性认知程度,为完善《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》)提供重要依据。结果显示,大部分被调查对象对CCUS技术有所了解,但是对于CCUS项目的环境安全性认识还比较模糊,未来《指南》的评估范围应侧重于采用最大可信事故计算CO₂在大气、地表水、地下水等扩散来定义或者根据CO₂运移分布来定量评估。CCUS技术各环节对环境风险影响大小进行排序,捕集环节应该重点考虑捕集工艺和环境风险物质,运输环节重点考虑运输设备材质、运输方式和运输规模,利用和封存环节建议4项因素均需充分考虑。

关键词: 二氧化碳; 利用与封存; 关注度; 环境风险; 技术指南

DOI: 10.13205/j.hjgc.201802002

QUESTIONNAIRE SURVEY ON ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT FOR CARBON DIOXIDE CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE

CAO Li-bin¹, ZHAO Xue-tao¹, CAI Bo-feng¹, GU Ying-ying², ZHOU Ying¹, LI Qi³,
MA Jin-feng⁴, HU Li-sha⁵, WANG Yong-sheng⁶, ZHAO Xing-lei⁷, WANG Bao-deng⁷

(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. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. China State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. National & Local Joint Engineering Research Center of Carbon Capture and Storage Technology, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 5. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China; 6. Shenhua Ordos Coal Liquefaction Corporation, Ordos 017209, China;
7. Process & Engineering Center, National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102209, China)

Abstract: Based on the questionnaire survey for government officers, researchers and staffs in related enterprises engaged in climate change, their environmental safety awareness degree of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology and related projects was analyzed. The survey provided a solid basis to improve the "Technical Guideline on Environmental Risk Assessment for Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage (on Trial)". The results showed that most of the respondents knew about the CCUS technology, but their understandings about its environmental safety were limited. The future assessment in the guideline should focus on the calculation of carbon dioxide diffusion in the atmosphere, surface water, and groundwater by the most credible accidents, or according to the carbon dioxide transport distribution. The factors of the CCUS were ranked according to their degree of influence on environmental risk. The capture technology should focus on capture process and environmental risk substances. The transportation technology should focus on transport equipment material, transportation method and scale. The utilization and storage technology should take all the four factors into account.

Keywords: carbon dioxide; utilization and storage; awareness; environmental risk assessment; technical guideline

* 基于排放源的温室气体减排与相关政策研究。

收稿日期: 2017-08-01

0 引言

CCUS(carbon capture utilization and storage, 碳捕集、运输、利用与封存)技术是以减少人为 CO₂ 排放为目的的技术体系,通过 CCUS 技术有望实现化石能源利用过程中 CO₂ 的近零排放^[1]。然而,环境安全性一直是 CCUS 项目发展的制约因素之一^[2-3]。环境保护部在 2016 年 6 月 21 日发布了《二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)环境风险评估技术指南(试行)》^[4](以下简称《指南》),其作为发展中国家第 1 个 CCUS 环境风险评估技术文件,填补了发展中国家在这一领域的空白^[5]。

《指南》明确了二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估的流程,推荐以定性评估为主的风险矩阵法,提出了环境风险防范措施和环境风险事件的应急措施,对于加强二氧化碳捕集、运输、利用和封存全过程中可能出现的各类环境风险的管理具有重要意义。然而,《指南》中环境风险评估还处于定性阶段,不足以指导政府管理部门和企业开展环境风险评估工作。本研究通过对 CCUS 项目利益相关方开展调查,了解各利益相关方对 CCUS 项目环境安全影响的了解程度,并进行统计分析,识别《指南》中关键技术环节的重要指标,为《指南》完善提供指导。

1 研究方法

1.1 问卷设计

问卷调查包括三部分内容:第一部分是个人的基本情况调查,即影响 CCUS 环境风险评估的因素,包括性别、年龄、教育程度、从事环境管理/技术领域工作年限、职业类型等。第二部分是调查对象对 CCUS 技术的认知程度,主要考察调查对象对 CCUS 技术的了解程度以及 CCUS 项目实施对环境影响的认知程度。第三部分是 CCUS 各技术环节项目对环境风险影响的重要性排序,包括五部分:环境风险评估流程的合理性;环境风险评估范围的确定依据和最小评估范围的参考值;捕集环节不同技术因素对环境风险影响的程度,其中技术因素包括捕集规模和捕集量、捕集设备材质、捕集工艺和环境风险物质以及二氧化碳气流纯度;运输环节不同技术因素对环境风险影响的程度,其技术因素包括运输方式、运输设备材质、运输路线、运输规模;利用和封存环节不同技术因素对环境风险影响的程度,其技术因素包括地质结构特性、二氧化碳注入参数、井的数量和深度、场地及周边的开采活动。第三部分内容采用二分变量测

量,结果通过概率获得;技术因素对环境风险影响的重要性排序均采用李克特 5 点量表进行测量,得分越高说明技术因素对环境影响越大。

1.2 调查样本

本研究设计的问卷在“二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术培训会”现场发放,问卷发放对象包括政府、科研院所、学校和 CCUS 相关的企业单位的相关人员。被调查对象为环境管理领域的管理人员、科研人员和 CCUS 项目一线工作人员,均获得大专以上学历,其中拥有研究生以上学历的人数占总调查人数的 70%。此次共发放问卷 82 份,其中有效回收问卷 77 份,回收率约 93.9%^[6]。总体来说,被调查对象涉及到各个年龄段和不同的工作单位类型,研究结果具有广泛性和代表性。调查样本的基本情况见表 1。

表 1 调查样本基本情况及构成

基本情况	人员情况	频数	占比/%
性别	男	44	57
	女	33	43
年龄	<35 岁	38	49
	35~45 岁	20	26
	45~55 岁	18	23
	>55 岁	1	1
受教育程度	高中及以下	0	0
	大学及同等学历	23	30
	硕士	42	55
	博士	12	15
单位性质	政府及事业单位	38	49
	科研院所及高校	25	33
	企业	14	18
职业类型	技术人员	35	45
	管理人员	20	26
	教育者	6	8
	其他	16	21

1.3 数据分析与处理

利用 Stata 软件进行统计描述,包括数据管理、统计分析、图表分析。本研究主要用于对 CCUS 指南评价指标的描述性分析与统计比较,以及影响因子与评价指标之间的相关性分析等。

2 结果与分析

2.1 被调查者对 CCUS 的认知程度

通过问卷调查数据分析被调查对象对 CCUS 技术的认知情况。结果显示:68% 的被调查对象听说过 CCUS 技术,32% 的被调查对象则完全没有听说过 CCUS 技术。从单位性质看,在政府及事业单位人员中,58% 的被调查对象听说过 CCUS 技术,42% 的被

调查对象则表示完全不了解 CCUS 技术; 科研院所和高校中 62% 的被调查对象听说过 CCUS 技术, 38% 的被调查对象则表示完全不了解 CCUS 技术; 企业的被调查对象 100% 全部了解 CCUS 技术。调查结果表明, 政府和事业单位的人员以及科研机构人员一半以上了解 CCUS 技术, 所有企业人员均了解 CCUS 技术。

CCUS 项目大规模实施后对环境的负面影响程度中, 5% 的被调查对象认为 CCUS 大规模实施对环境会产生严重的负面影响, 34% 的被调查对象认为 CCUS 项目对环境的负面影响不是特别显著, 29% 的被调查对象认为 CCUS 项目实施不会对环境造成负面影响, 另外 32% 的被调查对象表示不清楚 CCUS 项目大规模实施对环境的影响。

从单位性质看, 政府部门的被调查对象中, 5% 的被调查对象选择 CCUS 项目会对环境产生严重的负面影响, 24% 的被调查对象认为 CCUS 项目对环境的负面影响不显著, 26% 的被调查对象表示 CCUS 项目不会对环境产生负面影响, 另外 45% 的人选择不了解 CCUS 项目对环境的影响。科研院所调查结果的分布规律与政府部门类似, CCUS 项目对环境产生严重的负面影响到不了解 CCUS 项目对环境产生的影响比例分别为 4%、42%、25% 和 29%。企业工作人员由于在生产一线, 对 CCUS 项目的实际运营比较了解, 其中 7% 的被调查对象认为 CCUS 项目会对环境产生严重的负面影响, 40% 的被调查对象认为 CCUS 项目对环境的负面影响尚不显著, 40% 的被调查对象认为 CCUS 项目不会对环境产生负面影响, 另外 13% 的被调查对象不清楚 CCUS 项目和环境之间的影响关系。结果说明政府、事业单位人员和科研院所人员大部分不了解 CCUS 项目实施后对环境的影响程度, 企业人员则较为清楚。

2.2 CCUS 环境风险评估指南程序认可度分析

对调查问卷中环境风险指南程序的认可度进行分析, 结果显示: 21% 被调查对象不清楚《指南》中环境风险评估流程的合理性, 77% 的被调查对象认为《指南》中环境风险评估流程合理, 另外 3% 的被调查对象认为《指南》中环境风险的评估流程不合理。一种观点认为评估流程首先应该确定环境本底值, 然后确定风险源, 最后评估风险范围; 另一种观点认为应该首先确定风险源和受体, 然后确定评估范围。从结果来看, 说明《指南》中环境风险评估指南程序较为合理。

其中, 政府部门和事业单位工作人员中, 29% 的被调查对象不清楚《指南》中环境风险流程是否合理, 71% 的被调查对象认为《指南》中环境风险流程合理; 科研院所和高校中, 4% 的被调查对象不清楚《指南》中环境风险流程是否合理, 92% 的被调查对象认为《指南》中环境风险流程合理, 另外 4% 的被调查对象认为不合理, 并提出合理的建议; 企业中, 40% 的被调查对象不清楚《指南》中环境风险流程是否合理, 53% 的被调查对象认为《指南》中环境风险流程合理, 7% 的被调查对象认为《指南》中评估流程不合理, 并提出了合理建议。

2.3 地质利用与封存环境风险评估范围的认可度分析

对调查问卷中环境风险评估范围的合理性进行分析, 结果显示: 69% 的被调查对象认为采用最大可信事故计算 CO_2 在大气、地表水、地下水等扩散定义评估范围最合适, 还有 68% 的被调查对象认为根据 CO_2 运移分布定义地下评估范围最合适, 32% 的被调查对象认为以水文地质单元作为地下评估范围最合适, 18% 的被调查对象认为地上地下的评估范围应该统一, 不需要分开定义, 另外 10% 的被调查对象认为应该直接以前期调查范围作为评估范围最合适。

从调查结果来看, 采用最大可信事故计算 CO_2 在大气、地表水、地下水等扩散定义评估范围, 或者根据 CO_2 运移分布定义地下评估范围两项最为合适。

在最小评估范围的确定中, 8% 的被调查对象认为最小评估范围应该在 1 km 范围内, 13% 的被调查对象认为最小评估范围应该在 3 km 范围内, 18% 的被调查对象认为最小评估范围应该在 5 km 范围内, 16% 的被调查对象认为最小评估范围应该在 10 km 范围内, 还有 32% 的被调查对象不清楚最小评估范围选择多少较为合适。除此之外, 最小评估范围的确定还有以下 3 种观点: 一是认为最小评估范围应该按照封存量确定; 二是建议参考地下水评估导则来确定最小评估范围; 三是以具体时间模型预测为准, 从而确定评估范围。从调查结果来看, 被调查对象对最小评估范围还未有充分的认识, 因此在给定最小评估范围时, 还需要进一步提出给定该值的依据。

2.4 CCUS 环境风险评估指标重要性分析

分析捕集环节中 4 项主要内容在 CCUS 环境风险评估中的重要性, 结果如图 1 所示。可知: 各指标分数由高到低依次为: 捕集工艺和环境风险物质 (4.03) > 捕集规模和捕集量 (3.75) > 捕集设备材质

(3.62) > 二氧化碳气流纯度(3.52)。

运输环节 4 项主要内容在 CCUS 环境风险评估中的重要性 指标分数由高到低依次为: 运输设备材质(3.82) > 运输方式(3.75) > 运输规模(3.73) > 运输线路(3.62)。

利用和封存环节 4 项内容在 CCUS 环境风险评估中的重要性 指标分数由高到低依次为: 地质结构特性(4.30) > 场地及周边的开采活动(4.09) > 二氧化碳注入参数(3.99) > 井的数量和深度(3.92)。

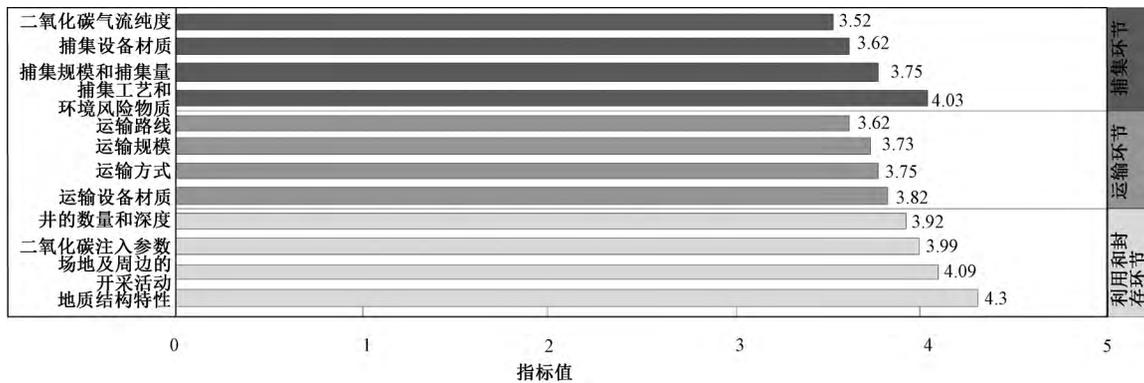


图 1 CCUS 环境风险评估指标重要性排序

Fig.1 Ranking of the importance of indexes of environmental risk assessment for CCUS

2.5 被调查者的背景对 CCUS 环境风险评估指标重要性的影响

CCUS 环境风险评估指标重要性分析中,为了探讨重要性指标的排序是否与被调查人的背景有关,本文采用卡方检验来比较被调查对象的背景与环境风险评估指标的关联性关系^[7]。计算如式(1)所示。

$$\chi^2 = \sum \frac{(A - E)^2}{E} = \sum_{i=1}^k \frac{(A_i - E_i)^2}{E_i} = \sum_{i=1}^k \frac{(A_i - np_i)^2}{np_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (1)$$

式中: A_i 为水平的观测频数; n 为总频数; p_i 为 i 的水平期望频率; E_i 为 i 水平的期望频数; k 为单元格数; i 为水平的期望频数; T_i 为总频数 $n \times i$ 水平的期望频率 p_i 。当 n 较大时, χ^2 统计量近似服从 $k - 1$ 个自由度的卡方分布,自由度为 $(3 - 1) \times (5 - 1) = 8$ 。

比较捕集环节、运输环节以及利用封存环节 12 项主要内容的临界值和统计量(见表 2),显著水平 $\alpha = 0.05$ 。其中,捕集环节 2 项指标,即捕集规模和捕集量与二氧化碳气流纯度, $P < \alpha$,说明这 2 项指标受被调查对象背景的影响,其余 10 项指标均 $P > \alpha$,说明 CCUS 环境风险评估指标的重要性不受被调查对象背景的影响。

3 结论

通过此次调查,掌握了环境保护管理人员、科研人员和企业人员对 CCUS 的了解程度,明确了《指南》完善的方向。总体来说,被调查对象对 CCUS 有基本

表 2 被调查对象背景对 CCUS 环境风险评估指标重要性影响的结果比较

Table 2 Comparison of the effect of background of the study subjects on environmental risk assessment for CCUS

CCUS 环境风险指标	P 值	CCUS 环境风险指标	P 值
捕集规模和捕集量	0.021	运输路线	0.267
捕集设备材质	0.062	运输规模	0.269
捕集工艺和环境风险物质	0.079	地质结构特性	0.105
二氧化碳气流纯度	0.007	二氧化碳注入参数	0.129
运输方式	0.089	井的数量和深度	0.126
运输设备材质	0.167	场地及周边的开采活动	0.457

了解,但对 CCUS 项目的环境安全性了解甚少。原因在于: 1) 国内外 CCUS 项目的安全性还处于研究阶段; 2) 国内外关于 CCUS 项目的安全性宣传相对缺乏,公众了解的方式相对单一^[8]; 3) 政府管理人员比较了解《指南》的管理程序,对 CCUS 技术了解相对缺乏,企业人员对 CCUS 技术比较了解,对《指南》中的评估程序理解较弱。未来应着重对政府管理人员宣贯 CCUS 技术,有效管理企业; 对企业人员宣贯《指南》,有效执行政府规定。

调查问卷对《指南》的完善提供了方向。目前出台的《指南》中,CCUS 环境风险评估指南程序相对合理,被调查对象普遍能接受目前的评估程序。今后在《指南》完善上,评估范围建议采用最大可信事故计算 CO_2 在大气、地表水、地下水等扩散定义或者根据 CO_2 运移分布来定义,在最小评估范围测算中,除了

(下转第 26 页)

措施比较保守,特别是井下各层套管、生产管柱均采用高等级防腐蚀材质;井下监测设备、传输电缆及配件全部选用国外进口材料;项目规模小监测设施所占比重偏大,因此整个项目成本较高。今后工程化CCUS项目可以充分借鉴示范项目的经验,在满足《指南》要求的情况下,重点研究开发更经济、更有效的工艺路线及监测技术。

参考文献

- [1] 中国21世纪议程管理中心.《第三次气候变化国家评估报告》特别报告:中国二氧化碳利用技术评估报告[M].北京:科学出版社,2014:206.
- [2] Liu Hejuan, Were P, Li Qi, et al. Worldwide status of CCUS technologies and their development and challenges in China [J]. *Geofluids*, 2017(8): 1-25.
- [3] 中华人民共和国环境保护部.二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)[EB/OL].北京:环境保护部,2016 [2017-10-03]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201606/W020160624568856649202.pdf>.
- [4] 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(增刊1):203-207.
- [5] 李琦,井森.二氧化碳注入引起的井筒周围岩石损伤的热孔耦合分析[J].*岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11):2205-2213.
- [6] 魏晓琛,李琦,邢会林,等.地下流体注入诱发地震机理及其对CO₂地质封存工程的启示[J].*地球科学进展*, 2014, 29(11):1226-1241.
- [7] 匡冬琴,李琦,王永胜,等.神华碳封存示范项目中的CO₂注入分布模拟[J].*岩土力学*, 2014, 35(9):2623-2641.
- [8] 李琦,石晖,杨多兴.碳封存项目井喷CO₂扩散危险水平分级方法研究[J].*岩土力学*, 2016, 37(7):2070-2078.
- [9] Fei Wenbin, Li Qi, Wei Xiaochen, et al. Interaction analysis for CO₂ geological storage and underground coal mining in Ordos Basin, China [J]. *Engineering Geology*, 2015, 196(28): 194-209.
- [10] 刘兰翠,李琦.美国关于二氧化碳地质封存井的要求[J].*低碳世界*, 2013, 20(1):20-42-52.
- [11] 匡冬琴,李琦,陈征澳,等.全球CCUS废气井法规现状及其对中国的启示[J].*天然气与石油*, 2015, 33(4):37-41.
- [12] 李琦,宋然然,匡冬琴,等.二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展[J].*地球科学进展*, 2016, 31(3):225-235.
- [13] 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*, 2013, 28(6):718-727.
- [14] 刘学浩,李琦,方志明,等.一种新型浅层井CO₂监测系统的研发[J].*岩土力学*, 2015, 36(3):898-904.
- [15] Li Xiaochun, Li Qi, Bai Bing, et al. The geomechanics of Shenhua carbon dioxide capture and storage (CCS) demonstration project in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(6): 948-966.
- [16] Li Qi, Li Xiaying, Liu Guizhen, et al. Application of China's CCUS environmental risk assessment technical guidelines (Exposure Draft) to the Shenhua CCS project [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114(SC): 4270-4278.

作者:王永胜(1982-)男,工程师,在读博士,主要从事CCUS工程示范及关键技术集成和二氧化碳咸水层地质封存科研探索。
wangyongsheng@csccl.com

(上接第9页)

提供具体的数值以外,同时应该提供选取数值的依据。CCUS技术各环节对环境风险的影响因素中,建议充分考虑重要性相对排名靠前和不受被调查者背景影响的指标,如捕集环节应该重点考虑捕集工艺和环境风险物质,运输环节重点考虑运输设备材质、运输方式和运输规模,而利用和封存环节建议4项指标均需充分考虑。

参考文献

- [1] IEA. 20 Years of Carbon Capture and Storage Accelerating Future Deployment [M]. Paris: IEA Publication, 2016.
- [2] Damen K, Faaij A, Turkenburg Wim. Health, safety and environmental risks of underground CO₂ storage overview of mechanisms and current knowledge [J]. *Climate Change* 2006, 74: 289-318.
- [3] 李琦.规模化咸水层CO₂封存中环境与安全风险评估研究[C]//第415次香山会议:规模化二氧化碳咸水层封存的关键科学技术问题.北京,2011.
- [4] 中华人民共和国环境保护部.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[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201606/t20160624_356016.htm.
- [5] 曹丽斌,周颖,李琦,等.推动中国二氧化碳捕集、利用与封存项目环境风险管理[J].*环境经济*, 2017, 16: 28-31.
- [6] 风笑天.现代社会调查方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [7] 马丽.基于多元统计分析的中国CCUS示范项目技术指南研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [8] Li Q, Liu G, Cai B, et al. Public awareness of the environmental impact and management of carbon dioxide capture, utilization and storage technology: The views of educated people in China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19(8): 2041-2056.

第一作者:曹丽斌(1991-)男,硕士,主要从事气候变化和环境政策研究工作。caolb@caep.org.cn

通信作者:赵学涛(1975-)男,博士,主要从事环境统计、政策与规划研究工作。zhaopt@caep.org.cn