

二氧化碳地质封存环境风险评估的空间范围确定方法研究*

李琦¹ 刘桂臻¹ 蔡博峰² 马劲风³ 曹丽斌² 周颖²

(1. 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 430071; 2. 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; 3. 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)

摘要: 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 作为应对气候变化、减少温室气体排放的一种技术,其环境风险管理是项目开展的重要保障。为规范和指导 CCUS 项目的环境风险评估工作,环境保护部制定了《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》)。《指南》定义了地质利用与封存环节的评估范围,但缺乏相关的应用方法。在总结归纳国内外 CCUS 项目和相关法律法规关于环境风险评估范围的基础上,对决定风险评估空间范围的主要影响因素进行分析,明确了二氧化碳地质封存项目环境风险评估空间范围的确定原则与方法,即简单函数法、数值模拟法和案例对比法。

关键词: 二氧化碳; 地质封存; 环境风险; 简单函数; 数值模拟; 案例对比

DOI: 10.13205/j.hjgc.201802006

PRINCIPLE AND METHODOLOGY OF DETERMINING THE SPACIAL RANGE OF ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT OF CARBON DIOXIDE GEOLOGICAL STORAGE

LI Qi¹, LIU Gui-zhen¹, CAI Bo-feng², MA Jin-feng³, CAO Li-bin², ZHOU Ying²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Center for Climate and Environmental Policy, Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China, Beijing 100012, China; 3. National & Local Joint Engineering Research Center of Carbon Capture and Storage Technology, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Carbon dioxide (CO₂) capture, utilization and geological storage (CCUS) is a new climate mitigation technology. The environmental assessment management is an important guarantee for the application of this technology. In order to standardize and guide the environmental risk assessment (ERA) of the CCUS project, the Ministry of Environmental Protection of China released a trial version of "CCUS Environmental Risk Assessment Technical Guidelines" in 2016. The guidelines defined the spatial range of environmental risk assessment of CO₂ geological storage, but lacked the relevant operation method. In this paper, the ERA of worldwide CO₂ geological storage projects and relevant laws and regulations were firstly summarized. Then, the main influence factors of the assessment spatial range were analyzed. Finally, the principle and methodology of determining the spatial range of ERA for CO₂ geological storage were put forward, and three methods, i. e. simple function, numerical simulation, and case contrast, were introduced for the guidelines.

Keywords: carbon dioxide; geological storage; environmental risk assessment; simple function; numerical simulation; case contrast

0 引言

二氧化碳(CO₂)捕集、利用和封存(CCUS)是应

对气候变化、减少温室气体排放的新兴技术^[1]。环境风险管理是项目能否顺利开展的重要保障,是公众对CCUS项目的主要关注点之一,也是CCUS项目是否能够顺利展开的关键^[2-3]。

二氧化碳在捕集、运输、利用与封存环节均有可

* 环保部环境保护项目(CL(2017)08-08);“十二五”国家科技支撑计划(2014BAC18B01)。

收稿日期:2017-08-01

能发生泄漏,进而危害环境安全。在捕集与运输环节,主要是管道和设备的泄漏,但最受公众关注的是地质利用与地质封存环节的泄漏,如二氧化碳在封存过程中,沿着井筒、裂缝、断层的泄漏,通过储层和盖层的扩散与泄漏等。 CO_2 一旦泄漏至浅部地层或大气,可能影响人类健康、造成动物窒息、影响土壤生物系统及植被根系,改变生态系统平衡;泄漏的 CO_2 溶解至地下流体,将造成地下水污染,干扰地下生态系统; CO_2 与储层流体的置换,有可能导致地表隆起、诱发地震、损坏烃类或其他矿物资源等^[4-5]。

环境风险评估能够解决CCUS项目的安全性和公众信任等问题,为项目工程的顺利开展提供依据。为规范和指导CCUS项目的环境风险评估工作,环境保护部制定了《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》),于2016年7月1日起颁布实施^[6]。

该《指南》明确指出适用于陆上新建或改扩建二氧化碳捕集、地质利用与地质封存项目的环境风险评估,并提出了环境风险评估流程,对评估的时空范围进行定义,列出了各环节的环境风险源及主要评估内容,并推荐以定性评估为主的风险矩阵法。

需要指出的是,作为一部试行的技术指南,该《指南》还存在一些不足,需要更多的研究工作进行补充与完善,其中包括风险评估空间范围的确定。《指南》对于地质利用与地质封存环节的评估范围划定为可能会受到注入活动影响的地上和地下空间。由于复杂的地下条件与地下空间的不可见性,以及仅有少数几个试点工程,缺乏实际工程资料的支撑,因此需要更多的工作以完善支撑《指南》中关于环境风险评估范围的确定。

本文将总结归纳国内外二氧化碳地质封存项目

和相关法律法规关于环境风险评估范围的成果,分析决定风险评估空间范围的主要影响因素,建立适合中国二氧化碳地质封存项目环境风险评估空间范围的确定方法,补充完善《指南》中关于风险评估范围的说明与操作,指导CCUS的环境风险评估工作,以促进中国CCUS项目的健康发展。

1 国内外研究现状

加拿大标准协会(Canadian Standards Association, CSA)、欧盟(European Communities, EU)、美国环境保护局(U. S. Environmental Protection Agency, EPA)等从不同角度定义了二氧化碳地质封存的边界和审查区域。CSA Z741——二氧化碳地质封存标准定义了项目的物理边界,包括地表边界和地下边界。地表边界应包括所有的项目场址(注入场地、相关工业设备、固定和永久的监测设备)和直接隶属于封存项目的办公室。地下物理边界包括了二氧化碳注入可能施加重要物理效应的地下体积及其上覆表面积^[7]。EU Directive 定义了封存复合体及监测区域。封存复合体(storage complex)是指存储地点和周边地质域,该区域可以对整体存储的完整性和安全性产生影响,即二次封闭构造^[8]。美国EPA六类井规范提出了审查区域(area of review, AoR)的定义及其计算。AoR是地质封存项目周边,地下饮用水水源(USDWs)可能受到威胁的区域。该区域通过计算模型勾画,计算了注入二氧化碳和被驱替流体所有相态的物理和化学性质,且基于可用的场地表征、监测和操作数据计算^[9-10]。

我国的一些环境影响评价及环境风险评价对不同的评估范围给出了定义,有些定义在一定程度上适用于二氧化碳地质封存环境风险评价,还有一些内容可以进行借鉴以定义地质封存的环境风险评价,详细分析如表1所示。

表1 中国既有导则与指南的适用性分析

Table 1 Analysis of the applicability of China's guidelines

导则	适用性分析
《建设项目环境风险评价技术导则》	不适用于二氧化碳地质封存,由于二氧化碳既不属于有毒易燃物质,也不属于易爆物质。但是可以考虑参考GBZ2的接触限值及敏感区位置来确定地表影响评价范围
《环境影响评价技术导则 总纲》	总则适用
《环境影响评价技术导则 大气环境》	二氧化碳不属于污染物,但是导则对D10%以及圆或矩形的定义可参考
《环境影响评价技术导则 地面水环境》	在一定范围内适用。如果油田不采用井口回收, CO_2 泄漏后,造成小范围内 CO_2 浓度升高,附近地表水中 CO_2 溶解度增加,酸性增加
《环境影响评价技术导则 地下水环境》	公式法以水压头计算,不适用于二氧化碳地质封存,不同项目规模大小不一,查表法所列数值不恰当,所处水文地质单元作为评估范围在一定程度上适用
《环境影响评价技术导则 生态环境》	在一定范围内适用于二氧化碳地质封存的生态环境评估
《环境影响评价技术导则 陆地石油天然气开发建设项目》	不适用
中国石化环境风险评估指南	仅考虑地表因素,二氧化碳地质封存要考虑地下 CO_2 羽流的存在

目前我国对二氧化碳地质封存环境风险的研究,还停留在初步风险识别阶段,主要是对可能造成的风险进行分析^[11-12]。但在一些针对具体项目进行风险评估的研究中,也没有提出具体的评估范围^[13-14]。

当前国内已开展的CCUS项目中,依据HJ/T 169—2004《建设项目环境风险评价技术导则》对中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳地质封存示范项目的地面单元进行评估^[15],地下部分封存单元的评估基于美国EPA的脆弱性评估框架(Vulnerability Evaluation Framework)和基于TOUGH2流体运移模型的数值模拟。吉林油田CO₂-EOR示范项目基于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》进行环境影响评估,强调工程建设的环境影响并进行其对地表水、空气、地下水和噪音

的一般性评估。吉林油田项目的环境风险评估只考虑注入站缓冲罐的泄漏和运输管道的泄漏,并没有考虑地下单元的封存风险。黑79区块地表的评价范围是以注入站为中心的半径为3 km的范围内^[16]。

2 影响因素分析

《指南》对于地质利用与封存环节的评估范围划定为可能会受到注入活动影响的地上和地下空间。图1为CO₂的泄漏通道^[18]。可以看出:注入至储层的CO₂在储层形成CO₂羽流向四周扩散,可能沿着注入井或废弃井、裂缝、断层等向上部地层泄漏,影响上覆地层,并进一步向地表运移,在低洼处形成累积或者通过风进行扩散。因此,其可能受到的空间范围主要由二氧化碳羽流的存在形态、泄漏通道的存在以及地形与气候等条件决定^[17]。

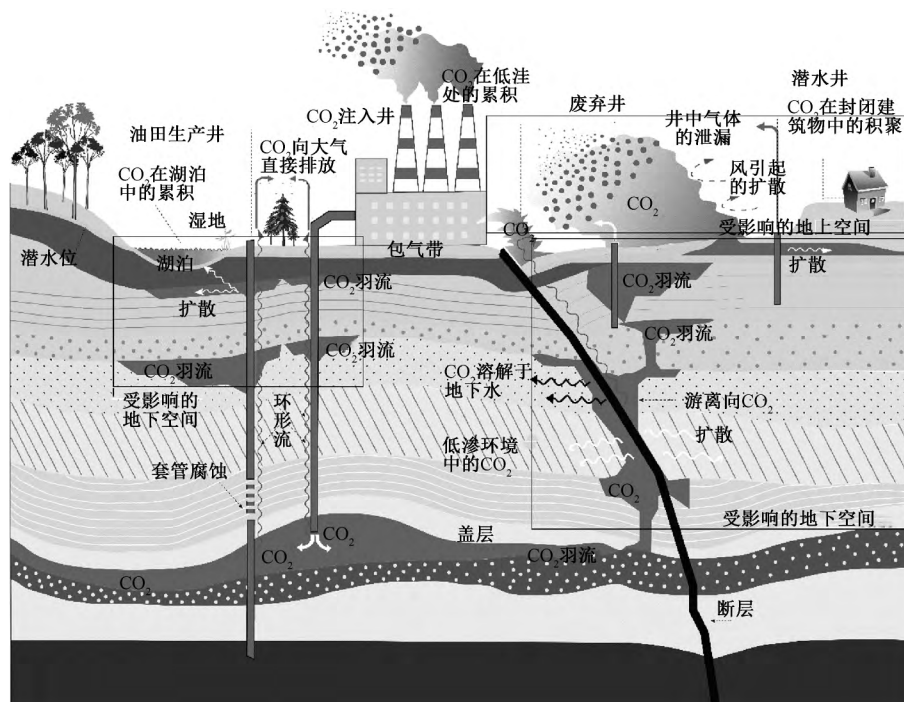


图1 CO₂地质封存的泄漏通道

Fig. 1 Leakage pathways of CO₂ geological storage

3 确定方法

3.1 原则

结合上文分析,本文提出二氧化碳地质封存环境风险评估空间范围的确定原则如下:

1) 评估范围应该通过二氧化碳在地下的运移行为来确定。

2) 评估范围应该覆盖地面和地下的所有注入场所、相关工业设备、固定和永久的监测设备。

图2所示为二氧化碳封存复合体影响与监测的

几个空间区域的划分与相互关系。

以该原则为核心,本文提出通过简单函数法、数值模拟法和案例类比法3种方法来确定CCUS环境风险评估的空间范围。

3.2 简单函数法

简单函数法是利用有限的、容易获得的参数,通过简单的函数计算,快速得到评估范围。依据美国能源部的DOE体积法进行有效封存容量评估的思想,通过有效封存容量计算公式进行推导,得到CO₂羽

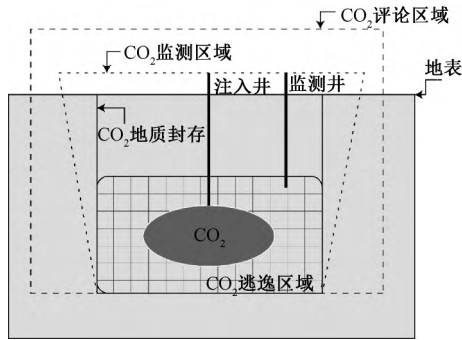


图2 环境风险评估范围示意

Fig. 2 Schematic diagram of environmental risk assessment scope

流的分布半径,进而通过分布系数计算评估范围。

本文以咸水层封存为例,计算步骤如下:

表2 咸水层内 CO₂ 置换系数Table 2 Replacement coefficient of CO₂ in saline aquifer

项目	符号	P ₁₀ /P ₉₀ 岩性划分			描述	
		碎屑岩	白云岩	石灰岩		
描述盆地和区域	面积系数	E _{An/At}	0.2/0.8	0.2/0.8	0.2/0.8	整个盆地或区域内适宜场地部分所占的比例
尺度上孔隙体积的地质参数	厚度系数	E _{hn/hg}	0.21/0.76*	0.17/0.68*	0.13/0.62*	总地质单元中能满足注入需求的最小孔隙率和最小渗透性的地层所占的比例
	孔隙率系数	E _{φ_e/φ_{tot}}	0.64/0.77*	0.53/0.71*	0.64/0.75*	全孔隙度中连通和有效的孔隙度所占的比例
单井注入式孔隙体积内的 CO ₂	体积置换系数	E _v	0.16/0.39*	0.26/0.43*	0.33/0.57*	由于 CO ₂ /水的密度差导致地层内能够接触 CO ₂ 的比例和能够与注入井射孔段接触 CO ₂ 比例的综合反映。
置换系数	微观置换系数	E _d	0.35/0.76*	0.57/0.64*	0.27/0.42*	孔隙内注入流体能够置换咸水的孔隙空间所占的比例。

注: * 数据来自于 IEA GHG (2009) [20]。

则羽流分布半径 $r = \sqrt{\frac{G_{CO_2}}{h_g \times \varphi_{tot} \times \rho_{CO_2} \times E_{saline} \times \pi}}$

式中: G_{CO_2} 为单井注入量,即总封存容量; h_g 为咸水层的厚度; φ_{tot} 为咸水层的平均孔隙率; ρ_{CO_2} 为二氧化碳密度; E_{saline} 为咸水层内 CO₂ 置换系数。

由于 CO₂ 羽流的分布可能位于评估范围的中心或边缘,因此确定评估半径 R :

$$R = nr = n \sqrt{\frac{G_{CO_2}}{h_g \times \varphi_{tot} \times \rho_{CO_2} \times E_{saline} \times \pi}} \quad (4)$$

式中: n 为面积系数,建议 $n \geq 2$ 。

3) 项目整体评估范围。

对于井群注入项目,可通过单井注入量计算单井的范围,评估范围应该覆盖所有井的子范围。井群内井间距大于单井评估半径的 2 倍时,可以分别对每口井进行评估范围划定,井群内井间距 \leq 评估半径的 2 倍时,则以外围井评估半径的外接圆或外接矩形为边界(图 3),建议外接圆优先。油气藏封存和不可采煤层封存均可通过类似的处理进行推导,在此不再赘述。

1) 咸水层封存有效封存容量计算公式如下^[19]:

$$G_{CO_2} = A_t h_g \varphi_{tot} \rho_{CO_2} E_{saline} \quad (1)$$

$$E_{saline} = E_{An/At} E_{hn/hg} E_{\varphi_e/\varphi_{tot}} E_v E_d \quad (2)$$

式中: G_{CO_2} 为深部咸水层的 CO₂ 封存容量; A_t 为深部咸水层面积; h_g 为深部咸水层厚度; φ_{tot} 为深部咸水层的平均孔隙率; ρ_{CO_2} 为二氧化碳密度; E_{saline} 为咸水层内 CO₂ 置换系数,其他参数具体解释如表 2 所示。

2) 咸水层单井注入的羽流分布半径计算。

根据式(1)可以推导出咸水层单井注入的羽流分布面积为 A_p :

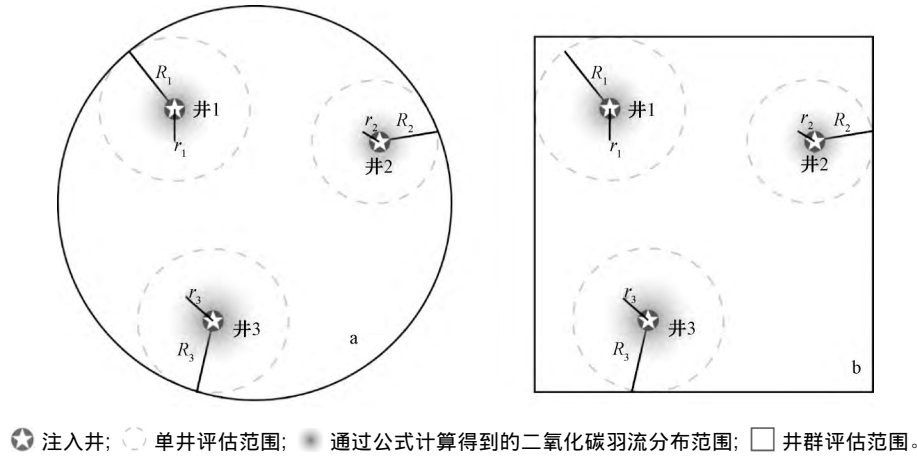
$$A_p = \frac{G_{CO_2}}{h_g \varphi_{tot} \rho_{CO_2} E_{saline}} \quad (3)$$

3.3 数值模拟法

数值模拟法是利用数值模拟手段,根据 CO₂ 羽流的分布和压力分布,确定环境风险评估范围。本文参考美国 EPA 六类井行动导则,即审查区域(AoR)评估和纠正行动指导,对数值模拟法提出具体操作建议。

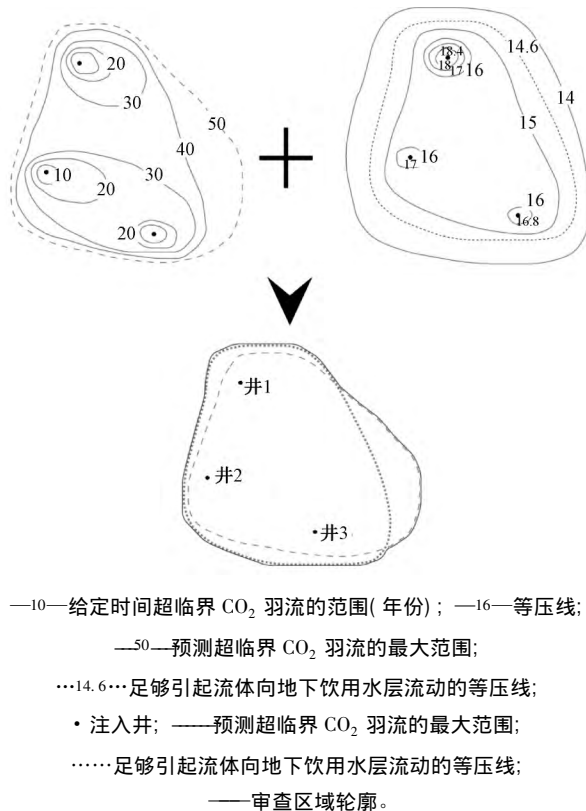
3.3.1 边界定义

EPA 的行动导则是综合考虑分离相 CO₂ 羽流和压力前沿(图 4)。其中,压力前沿是指由二氧化碳注入地下造成的压力上升区域。对于地质封存项目,二氧化碳羽流的压力前沿指的是有足够的压力差导致注入流体或地层流体运移至地下饮用水源(underground source of drinking water, USDW)。我国有关于地下水水源的界定,但是与美国的 USDW 概念不同。前者指的是正在使用的地下饮用水源,侧重于平面范围,而后者除了包括正在供应公共用水系统的含水层,还考虑具有满足供应条件的含水层及其部分,兼顾范围与地下深度。我国对地下水水源设定了各级保护区及准保护区,并对其污染防治管理规定提出了要求。但是对于潜在的地下水水源,并没有相关的定义。我国对地下水质量标准中的 V 类标



● 注入井; ○ 单井评估范围; ● 通过公式计算得到的二氧化碳羽流分布范围; □ 井群评估范围。
图 3 项目整体评估范围确定示意

Fig. 3 Schematic diagram of determining the overall assessment scope of one project



—10—给定时间超临界 CO₂ 羽流的范围(年份); —16—等压线;
—50—预测超临界 CO₂ 羽流的最大范围;
···14.6···足够引起流体向地下水层流动的等压线;
• 注入井; ——预测超临界 CO₂ 羽流的最大范围;
·····足够引起流体向地下水层流动的等压线;
——审查区域轮廓。

图 4 利用数值模拟法确定评估范围示意案例^[9]
Fig. 4 Using numerical simulation method to determine the assessment scope of one case^[9]

准定义为不宜饮用,其他用水可根据使用目的选用。该类水的溶解性总固体 > 2 000 mg/L。因此,可以考虑将含水层中溶解性总固体 < 2 000 mg/L 的水源视为地下饮用水源。据此计算压力前沿的压力值 P_{if} 为:

$$P_{if} = P_u + \rho_i g(z_u - z_i) \quad (5)$$

式中: P_u 为地下饮用水源含水层的初始压力; ρ_i 为注入层流体密度; g 为重力加速度; z_u 为地下饮用水源

含水层的代表性高程; z_i 为注入层的代表性高程。

3.3.2 计算过程

EPA 导则提出,计算模型中应包含多相流,所有能够实现 CO₂ 多相流计算的模型都可采用,但是反应运移和岩土力学过程并不是必须的。操作经营者或利益攸关方可以决定是否包含在内。相对于多相流模型,与界面地球化学有关的空间尺度非常小。同时模型的不确定性描述,即使用敏感性分析和进行模型校准非常重要^[21]。

3.4 案例类比法

案例类比法是综合当前已有 CCUS 项目的监测、模拟成果,参考已有 CCUS 项目的环境风险评估范围来确定。建议通过注入量、储层类型等要素进行对比。在项目的初期阶段,相关场地资料较为缺乏时,可以采用该方法进行范围的初步划定。目前尚未有使用案例类比法先例的公开报道。

4 结 论

本文首次明确提出了二氧化碳地质封存环境风险评估空间范围的 3 种确定方法,根据项目所处的阶段以及资料的丰富程度,可以针对性地选择不同的方法(图 5)。随着项目的开展,资料不断丰富和更新,评估范围也应该随之更新。

此外,限于篇幅,本文只是对于这 3 种方法进行了初步介绍,指出方法的核心思想,后续研究还需要从以下几个方面进行完善:

- 1) 对于简单函数法,咸水层的置换系数需要根据我国的实际条件取值。
- 2) 数值模拟法中对于压力前沿的计算需进一步讨论。

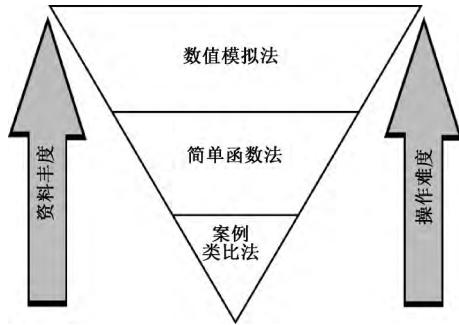


图5 二氧化碳地质封存环境风险评估空间范围确定方法

Fig.5 Methods for determining the spatial scope of environmental risk assessment of CO₂ geological storage

3) 案例类比法需要大量的 CCUS 案例数据支撑, 未来需要进一步更新 AGI-BDMS 大数据库^[22-23], 为方法的应用提供参考依据。

参考文献

- [1] 刘鸿志. 对我国二氧化碳捕集利用与封存环境管理的思考 [J]. 环境保护, 2013, 41(11): 36-38.
- [2] Chen Z A, Li Q, Liu L C, et al. A large national survey of public perceptions of CCS technology in China [J]. Applied Energy, 2015, 158: 366-377.
- [3] 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.
- [4] 刘兰翠, 曹东, 王金南. 碳捕获与封存技术潜在的环境影响及对策建议 [J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 290-295.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Canadian Standards Association. Draft Standard CSA Z741: Geological Storage of Carbon Dioxide [R]. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2011: 62.
- [8] European Communities. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 (Text with EEA relevance) [J]. Official Journal of the European Union, 2009, L140: 114-135.
- [9] Environmental Protection Agency. Geologic Sequestration of Carbon Dioxide-Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Area of Review Evaluation and Corrective Action Guidance [R]. Washington, D. C.: Office of Water, 2013: 83.
- [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): 42-52.
- [11] 王新. 我国碳捕获与封存技术潜在环境风险及对策探讨 [J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 53-57.
- [12] 耿海燕, 赵东风, 王嘉麟. 二氧化碳封存及提高石油采收率的环境风险研究 [J]. 安全与环境工程, 2012, 19(3): 55-58.
- [13] Li Q, Li X, Liu G, et al. Application of China's CCUS environmental risk assessment technical guidelines (Exposure Draft) to the Shenhua CCS Project [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 4270-4278.
- [14] Li Q, Shi H, Yang D, et al. Modeling the key factors that could influence the diffusion of CO₂ from a wellbore blowout in the Ordos Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(4): 3727-3738.
- [15] Li Q, Liu G, Liu X, et al. Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: 504-514.
- [16] 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.
- [17] 中国二氧化碳地质封存环境风险研究组. 中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [18] Liu L C, Li Q, Zhang J T, et al. Toward a framework of environmental risk management for CO₂ geological storage in China: Gaps and suggestions for future regulations [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 21(2): 191-207.
- [19] Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 188-202.
- [20] IEA GHG. Development of Storage Coefficients for Carbon Dioxide Storage in Deep Saline Formations [R]. Cheltenham, UK: IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009: 61.
- [21] Wei X, Li Q, Li X, et al. Uncertainty analysis of impact indicators for the integrity of combined caprock during CO₂ geosequestration [J]. Engineering Geology, 2015, 196: 37-46.
- [22] Li Q, Liu G, Liu X. Development of Management Information System of Global Acid Gas Injection Projects [M] // Gas Injection for Disposal and Enhanced Recovery. New York: Wiley, 2014: 243-254.
- [23] 李琦, 刘桂臻. AGI-BDMS 全球酸气回注项目大数据分析管理系统 V1.0 [S]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.

第一作者: 李琦(1972-) 男, 博士, 研究员, 主要从事酸气回注和二氧化碳地质封存与利用方面的研究工作。qli@whrsm.ac.cn