

不同类型二氧化碳地质封存项目的 环境监测问题与监测范围*

马劲风¹ 杨 杨¹ 蔡博峰² 曹丽斌² 周 颖² 李 琦³

(1. 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; 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. 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)

摘要: 针对 CO₂ 地质封存的环境监测范围与泄露风险评价的目标, 提出根据不同的 CO₂ 地质封存项目类型和地质构造特征, 需要采用不同的环境监测范围与关键监测数据。环境监测方法需要结合地质封存项目的可测量、可报告、可核查技术体系与监测数据, 评价 CO₂ 的实际封存量、泄漏量及环境风险。

关键词: CO₂ 地质封存; 泄漏; 环境风险; MRV; 环境监测

DOI: 10. 13205/j. hjgc. 201802003

ENVIRONMENTAL MONITORING RANGE FOR DIFFERENT TYPES OF CO₂ GEOLOGIC SEQUESTRATION PROJECTS AND ITS RELATED ISSUES

MA Jin-feng¹, YANG Yang¹, CAI Bo-feng², CAO Li-bin², ZHOU Ying², LI Qi³

(1. National & Local Joint Engineering Research Center of Carbon Capture and Storage Technology, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, 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. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the environmental monitoring range of CO₂ sequestration and the goal of risk assessment, it is suggested that different environmental monitoring ranges and key monitoring data should be adopted based on the different types of CO₂ sequestration projects and characteristics of geological structure. Environmental monitoring methods need to combine with monitoring, reporting and verification technologies and monitoring data to assess the actual storage, leakage and environmental risks of CO₂.

Keywords: CO₂ sequestration; leakage; environmental risk; monitoring reporting and verification; environmental monitoring

0 引言

碳捕集与封存也称做碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and sequestration, 简称 CCUS) 是目前大规模减少大气中 CO₂ 浓度增加的最快速、有效的方法, 并且世界上有十多个大规模 CCS 项目在运行中^[1]。用以封存 CO₂ 的深部构造, 在地下已经封存咸水或者油气藏达数百万年以上, 具备长期安全封存 CO₂ 的能力与条件。加上世界上诸多天然 CO₂ 气田的存在, 本身就证明了 CO₂ 可以在

* 科技部 863 计划“二氧化碳地质封存关键技术”(2012AA050103)。

收稿日期: 2017-08-01

地下构造圈闭和岩性圈闭中安全、长期的封存。然而, 仍然有很多不确定性因素可能导致地质封存 CO₂ 的泄漏并造成环境危害。比如 1986 年 8 月 21 日, 喀麦隆西北部的尼奥斯湖 (Lake Nyos) 深埋湖底发生 CO₂ 的喷发灾难^[2]; 2011 年 8 月 9 日, 美国 Denbury 资源公司在密西西比州 Yazoo City 开展的 CO₂ 强化驱油 (CO₂-EOR) 中, 大量 CO₂、原油和钻井泥浆喷出达 37 d, 造成井口附近的鹿等动物窒息。2013 年 7 月, Denbury 资源公司被密西西比州环境质量部罚款 662 500 美元^[3]。这说明在 CO₂ 驱油和地质封存过程中, CO₂ 泄漏风险是存在的, 而且可能造成较大

的环境损害。在国内油田开展 CO₂-EOR 及地质封存过程中,也出现过不少类似的不同类型的 CO₂ 泄漏问题,只是因为规模小且没有对人造成危害而没有被报道和关注。而未来即便是企业曾经发生过较小的 CO₂ 泄漏事故,也应当成为企业向环境监管部门报告的基础数据。

公众与环境保护部门对于 CCS 项目最大的担忧就是地质封存的安全性及其可能造成的环境问题^[4-6],因此环境保护部于 2016 年 6 月发布了《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》),第 1 次从国家的法律法规层面明确了 CCUS 项目环境风险评估与监管方法,对于国内开展 CCUS 的项目提出了规范和更高的环保要求。但是,具体实施该类环境风险评估技术与方法,还需考虑技术方法的成本、项目实施企业上报数据的完善性、项目特点,特别是封存 CO₂ 的深部地质构造特征及封存类型,即咸水层、油气层及煤层等封存类型的影响^[7-8]。

与此同时,目前在国家开展的温室气体清单核查中,需要使企业的温室气体排放量(包括减排量)可测量、可报告、可核查。这也为环境部门提供了 CO₂ 的封存量、泄漏量和环境风险评估的额外信息,即通过企业上报的数据,可以评估 CO₂ 注入量、封存量、泄漏量等。通过对 CO₂ 地质封存项目封存量进行评估,确定其泄漏量进而评价 CO₂ 泄漏对于环境的危害。

《指南》已经对地质封存、驱油等环节就环境风险源及风险受体的评估确定了全面的评估内容^[9]。本文主要从目前国内开展的几种类型 CO₂ 地质封存项目与深部构造特点出发,探讨该《指南》具体实施中可能需要考虑的环境监测范围、CO₂ 封存量和泄漏量的监测与报告制度等问题,为尽快对国内实施的 CCUS 项目进行环境风险评估提供帮助。

1 对 CO₂ 伴生气及天然 CO₂ 气田的环境监测

1.1 CO₂ 伴生气田

在油气田开发过程中,不少油气田均会伴生 CO₂ 气,当 CO₂ 伴生气浓度较高时,需要将天然气中的伴生 CO₂ 进行分离。比如 Sleipner CO₂ 地质封存项目是将挪威 Sleipner 气田的 CO₂ 捕集与分离,即对 Sleipner Vest 气田天然气中浓度为 4%~9% 的 CO₂ 进行提纯和分离,从而达到市场要求的浓度低于 2.5% 的标准。而从天然气中分离的 CO₂ 回注到地

下进行封存。

对于 CO₂ 含量高于市场要求的天然气,需将 CO₂ 进行分离和排放,这些排放的 CO₂ 对于区域环境的影响,应纳入《指南》的监管范围。发达国家对工业 CO₂ 排放的限制,使得油气公司不能开采高 CO₂ 含量的气田,或者是将天然气中所含 CO₂ 进行分离和封存。

目前在中国下扬子地区黄桥构造^[10]、四川盆地^[11]、松辽盆地^[12]、莺歌海盆地^[13]、济阳拗陷^[14-15]、三水盆地^[16]等都发现大量 CO₂ 伴生气田和纯天然 CO₂ 气田,并被开发和利用。在中国东部油气区发现的大量 CO₂ 气藏(田),属于无机成因,CO₂ 含量一般大于 60%,甲烷等烷烃气含量较低,一般小于 10%^[18]。这些 CO₂ 气藏(田)内不少井产出纯度极高的 CO₂,被用来驱油和销售。

对于天然气伴生 CO₂,需要企业报告及环境监管部门监测企业是否将 CO₂ 从天然气中分离出来。这个过程中,每年油气生产企业排放的 CO₂ 需要被量化和监测,从天然气中分离 CO₂ 的量和成本也应当是企业向环境部门报告的数据,在 CO₂ 含量较高的天然气中分离 CO₂ 是否划算和可行,其经济性也是衡量因素之一。

然后需要考虑在通过 CO₂-EOR 方式以及地质封存实现的地下 CO₂ 封存量,并评价生产井口 CO₂ 循环回收、回注量等。才能比较准确的评估油气田内 CO₂ 净排放造成的风险,也可评价油田开展 CO₂ 地质封存,减少 CO₂ 排放后周边环境的环境效应。

1.2 纯 CO₂ 天然气藏(田)

对于国内多数油气田来说,开采高纯度天然 CO₂ 成本极低,利用天然 CO₂ 驱油及出售获得经济效益,是较为普遍的做法^[18-19]。不过直接从地下开采 CO₂ 与我国的减排目标相悖,也加重了总体碳减排压力^[20]。因此,2013 年 5 月国家发改委气候司发布了《关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知》(发改气候[2013]849 号),提出“加强对二氧化碳天然气藏(田)的开采的管理,严格限制以利用为目的二氧化碳气藏(田)开发,逐步关停现有气田”。与此同时,开采 CO₂ 天然气藏(田)也抑制了企业从烟气、化工等废气中捕集 CO₂ 技术的发展,及油气行业利用工业废气中捕集的 CO₂ 进行驱油和封存。

在利用天然 CO₂ 驱油时,注入地下的部分 CO₂ 重新封存到地下,但仍然有相当部分的 CO₂ 随产出的原油泄漏到大气中,对环境带来危害。随着 CO₂

注入量的增多,井口产出 CO_2 量会越来越多。因此需要建立环境风险评估机制,监测 CO_2 输送到井口、注入地下这些过程的泄漏风险,以及井口产出 CO_2 的泄漏量,并评价其环境影响。

对于部分油气田在利用天然 CO_2 驱油和封存的同时,也同时购买了部分煤电厂、化工厂等捕集的 CO_2 进行驱油和封存,此种情况需要监测和报告 CO_2 捕集企业的捕集量、捕集时间、 CO_2 排空量、运输过程的安全性和确定实际注入量。对于企业在地下封存的 CO_2 ,环境监管部门需要知道其中捕集自工业排放源的 CO_2 比例。

2 CO_2 捕集、运输、驱油与封存项目的环境监测

CO_2 捕集过程中的 CO_2 泄露量一般并不大,属于可控范围。罐车或管道运输泄漏也可控制,但需要进行监控。

CO_2 -EOR 与封存过程中的泄漏风险是环境监测与评估的重点^[21]。目前国内的多数 CO_2 -EOR 项目没有进行生产井井口 CO_2 的回收与回注,造成井口 CO_2 大量泄漏。一般油田在开始注入 CO_2 时,泄漏量很少,随着注入量的增加和注入时间的延长,井口泄漏量会越来越大。因此国际上要求对产出的 CO_2 进行回收和回注,确保 CO_2 没有泄漏到大气中。对于小规模 CO_2 -EOR 与封存项目,井口不回收时,泄漏量不算大。而对于大规模的 CCS 项目,如不进行井口回收,则会有大量 CO_2 从井口泄漏而对环境造成损害。

对于没有井口回收再利用 CO_2 的 CO_2 -EOR 与封存项目,环境监测的重点在于评价井口泄露量及其对应环境的危害。对于有井口回收 CO_2 装置的项目来说,应当执行较《指南》更高要求的国际 CO_2 地质封存监测标准进行环境监测,如国际 ISO/TC265 碳捕集、运输和地质封存标准化委员会发布的相关标准等。

从泄漏的速率方面来讲, CO_2 慢速泄漏量小,不易被监测到,而成为封存安全性监测的难点^[22]。除了 CO_2 可泄漏到大气之外, CO_2 还可能泄漏到浅层,影响地下水层及深层未开发饮用水层的水质。这部分 CO_2 的监测也是环境监测的难点,因为其不一定会泄漏到地表,难以通过地面环境监测方法发现,因此需要企业提供证据来证明。

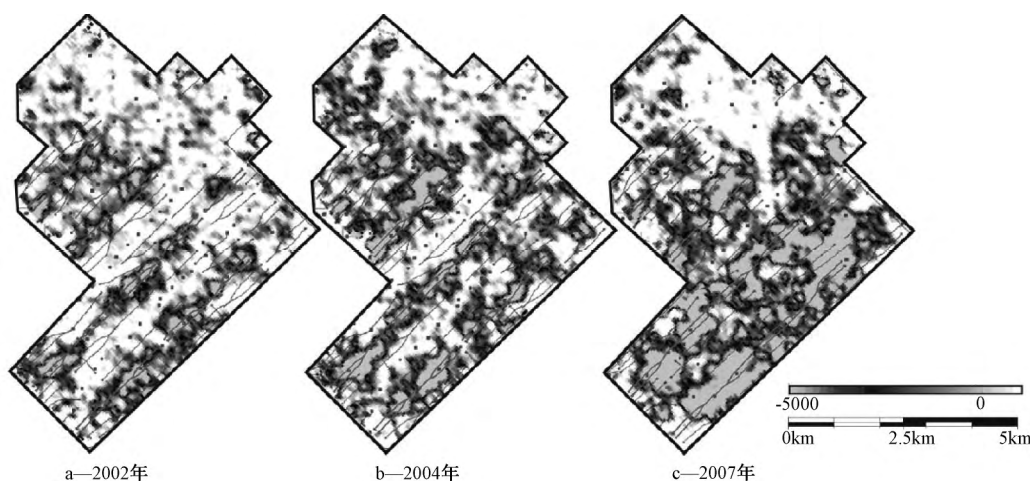
当然,井眼固井质量差、套管长期腐蚀也是导致 CO_2 从井眼泄漏的主要原因。需要企业上报井眼固井质量等报告,以便评价井眼的完整性与安全性^[23-24]。

3 CO_2 咸水层封存项目的环境监测范围

咸水层 CO_2 地质封存目前主要采用 2 种方式,即驱水^[26-28] 与不驱水封存。 CO_2 驱水项目主要停留在研究阶段,并没有进入实施阶段。目前,国际上 CO_2 咸水层封存项目几乎全部采用不驱水直接注入咸水层进行封存。这种方式与 CO_2 驱油及封存项目有很大不同, CO_2 -EOR 的方式是一种流体替换方式,即将 CO_2 注入地下,把油替换出来,这个过程可以确保地下储层压力保持在原始地层压力大小的范围,以便确保地质封存的安全性。咸水层封存与 CO_2 油层封存最大的不同,是对于地质封存体的认识深入程度不同。油田经过多年勘探、开发,积累了数量众多的钻井及地震、测井、地质研究资料,特别是诸多生产井可以用于观测 CO_2 在地下运移的状态,因此可以对 CO_2 在油层中的封存状态有更好的了解。而对于咸水层封存的长期封存安全性, CO_2 在地下分布范围,甚至地下咸水层分布范围、横向非均质性、砂体尖灭范围、薄互层等信息,认识程度不如油藏深入。这样,对于咸水层 CO_2 地质封存的监测范围、监测周期与监测技术还需要积累经验。监测范围较大为宜,监测方法最好遵循较《指南》要求更高的国际 ISO 标准进行环境监测。咸水层封存的优点是井眼少,井眼泄漏的安全性较 CO_2 驱油及封存项目易掌控,环境风险较 CO_2 -EOR 项目低。

4 地表环境监测范围、成本与地质封存深部构造的关系

从以往的 CO_2 驱油及地质封存项目中出现的与 CO_2 泄漏相关问题来看,环境监测与地下深部地质构造密不可分。首先是环境监测的范围与成本,取决于地下封存体的圈闭类型,属于构造圈闭还是岩性圈闭。然后,才是监测方法和技术的考量。如加拿大 Weyburn 油田, CO_2 封存体是埋深约 1 450 m 的 2 套碳酸盐岩储层。这 2 套储层在横向上没有被断层切割,碳酸盐岩储层横向延伸范围很大。因此封存 CO_2 后, CO_2 横向运移的范围可能非常大,甚至超出 Baseline 监测网的范围。图 1 是加拿大 Weyburn 项目四维地震监测的范围与结果^[29]。图中:灰色表示该年度观测的三维地震监测数据与 1999 年 Baseline 监测数据的差异。其中, CO_2 于 2000 年 10 月开始注入,到 2002、2004 和 2007 年分别累计注入 CO_2 280 万、370 万和 740 万 t。可以看出:到 2007 年 CO_2 已经运移出观测范围,与之相对应的土壤等环境监测网也已经无法观测监测区域外的信息。



注:双腿线表示水平生产井或者 CO₂ 注入井,灰色区域为 CO₂ 分布范围。

图 1 加拿大 Weyburn 油田 CO₂ 注入区 2002 2004 2007 年三维地震监测的 CO₂ 分布范围^[29]

Fig. 1 3D seismic monitoring area for CO₂ sequestration of Weyburn field in 2002, 2004 and 2007^[29]

因此,只有 CO₂ 注入区的监测范围较大,才能确保长期监测时 CO₂ 不会运移出监测区域。但监测范围大,又存在监测成本高的问题。对于开发后期的油田,注入区附近井眼众多,这些井眼都是可能的 CO₂ 泄漏点。一般建议以注入 CO₂ 油区的整个井覆盖范围为监测范围为宜,当然主要以井眼数据为基础,其他环境监测数据为辅,进行环境监测与风险分析,企业必须要上报所有井眼流体中连续的 CO₂ 含量变化数据。

对于断块型油气藏,监测问题则相对简单。比如中原油田 CO₂ 注入区块、胜利油田高 89-4 区块^[30,31] 等 CO₂ 注入区,储层被断层分割。这样监测目标可以集中于断块面积大小范围内,储层在地表的投影面积范围,一般无需考虑断块范围之外的监测,监测成本相对较低。当然如果断块内的注入井或者生产井井眼质量不好,也有可能出现 CO₂ 从井眼渗漏到断块范围之外的情况。

从高 89-4 区块的注入监测也发现:CO₂ 在构造低部位被注入后,由于开始注入阶段的储层压力没有达到混相,CO₂ 会顺着储层顶部首先向构造高部位运聚。这样,构造高部位是最先可能的泄漏区域,因此监测区域应当是以地下储层最高点为中心的埋深等值线在地表的投影范围。这个范围一般可以定在比储层内油水界面平面分布区域略微大一些的区域范围内,因为油水界面外的井一般是产水井。产水井之外不属于注水或者注 CO₂ 驱油的范围,一般井眼很少,可以只观测包含水井的范围即可。构造油气藏的

最大监测范围应当是溢出点的等高线所圈定的面积。

5 结 论

通过 CO₂ 地质封存项目的 MRV 和企业数据报告,可以帮助评价地质封存的有效封存量、安全性、泄漏风险与环境危害。对于利用 CO₂ 伴生气及天然 CO₂ 气开展驱油与封存的项目,其 CO₂ 开采、排放量都应当纳入环境监测与风险评估范围。对于 CO₂ 地质封存的实施场地环境监测范围,要针对项目的类型和地下地质构造的特征采用不同的监测范围。这样有利于最大限度地减少环境监测成本和提高监测效果。

参考文献

- [1] GCCSI. The Global Status of CCS: 2016 Summary Report [R]. 2016.
- [2] Kling G W, Clark M A, Wagner G N, et al. The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa [J]. Science, 1987, 236 (4798): 169-175.
- [3] Sherk G W, Romanak K D, Gilfillan S M, et al. Alleged leakage of CO₂ from the Weyburn-Midale CO₂ monitoring and storage project: Preliminary findings from implementation of the IPAC-CO₂ incident response protocol [C]//American Geophysical Union Fall Meeting. San Francisco, California: GCCC Digital Publication Series: 11-39.
- [4] Amy J. Denbury pays big fine for 2011 oil well blowout [EB/OL]. [2013-07-26]. <http://fuelfix.com/blog/2013/07/26/denbury-pays-big-fine-for-2011-oil-well-blowout/>. 2013-07-26
- [5] 中国 21 世纪议程管理中心,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究 [M]. 北京:地质出版社,2012: 282.

- [6] Holloway 李琦. 二氧化碳地下储存的安全性[J]. 水文地质工程地质技术方法动态, 2011(3/4): 108-110.
- [7] Li Qi, Liu Guizhen, Cai Bofeng, 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: 1-16.
- [8] Liu Lancui, Li Qi, Zhang Jiutian, 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, 2016, 21(2): 191-207.
- [9] Li Qi, Liu Guizhen. Risk Assessment of the Geological Storage of CO₂: A Review[M]. Vishal V, Singh T N, editor. New York: Springer, 2016: 249-284.
- [10] 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.
- [11] 郭念发, 尤孝忠, 雷一心, 等. 黄桥 CO₂ 气田特征及其勘探远景[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 14-18.
- [12] 刘文汇, 腾格尔, 张中宁, 等. 四川盆地高硫天然气成藏机理的同位素研究[J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(2): 166-178.
- [13] 杨春, 刘全有, 米敬奎, 等. 松辽盆地大庆长垣伴生气中二氧化碳成因讨论[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 244-249.
- [14] 陈刚, 何家雄, 张伟. 莺歌海盆地 CO₂ 成因及与国内外典型 CO₂ 气藏的类比[J]. 天然气地球科学, 1996, 7(4): 1-12.
- [15] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民, 等. 济阳拗陷二氧化碳气田的成因机制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(6): 712-718.
- [16] 张建锋, 张金功, 吴汉宁, 等. 济阳拗陷花沟 CO₂ 气藏形成与高青断裂活动性关系分析[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 356-361.
- [17] 唐忠驭. 三水盆地沉积、构造特征与油气田分布规律[J]. 新疆石油地质, 1986, 7(2): 16-23.
- [18] 李先奇, 戴金星. 中国东部二氧化碳气田(藏)的地质特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 215-221.
- [19] 何海宁. 中国最大二氧化碳气田存亡之争: 资源还是祸害?[EB/OL]. [2010-07-07]. <http://news.163.com/10/0708/11/6B2M16Q7000125LI.html>.
- [20] 霍建东, 黄惠敏. 国内二氧化碳市场分析[J]. 上海化工, 2013, 38(6): 34-39.
- [21] 蔡玉高, 孔祥鑫. 不符合节能减排的大趋势专家呼吁我国应有序禁采二氧化碳[N/OL]. 经济参考报, [2012-01-08]. http://dz.jjckb.cn/www/pages/webpage2009/html/2012-01/09/content_39318.htm?div=-1.
- [22] Yang C, Susan D, Hovorka S D, et al. Integrated framework for assessing impacts of CO₂ leakage on groundwater quality and monitoring-network efficiency: Case study at a CO₂ enhanced oil recovery site[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8887-8898.
- [23] Lewicki J L, Birkholzer J, Tsang C. Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: Identification of features, events, and processes and lessons learned[J]. Environmental Geology, 2007, 52(3): 457-467.
- [24] Carroll S, McNab W, Torres S, et al. Wellbore integrity in carbon sequestration environments: 1. Experimental study of cement-sandstone/shale-brine-CO₂[J]. Energy Procedia, 2011, 4(22): 5186-5194.
- [25] Liu Lancui, Li Qi. USA Regulation on injection well of CO₂ geological sequestration[J]. Low Carbon World, 2013, 20(1): 42-52.
- [26] Bentley R, Dahl S, Deiss A, et al. Optimizing accuracy of determinations of CO₂ storage capacity and permanence, and designing more efficient storage operations: An example from the Rock Springs Uplift[R]. Wyoming: Final Report to U. S. Department of Energy, 2015.
- [27] Li Qi, Wei Yani, Liu Guizhen, et al. CO₂-EWR: A cleaner solution for coal chemical industry in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 330-337.
- [28] 李琦, 魏亚妮. 二氧化碳地质封存联合深部咸水开采技术发展[J]. 科技导报, 2013, 31(27): 65-70.
- [29] White D J. Monitoring CO₂ storage during EOR at the Weyburn-Midale Field[J]. The Leading Edge, 2009, 28(7): 838-842.
- [30] Wang Haofan, Ma Jinfeng, Li Lin, et al. Time-lapse seismic analysis for Gao89 area of CO₂-EOR project in SINOPEC Shengli Oilfield, China[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 3980-3988.
- [31] Lv Guangzhong, Li Qi, Wang Shijie, et al. Key techniques of reservoir engineering and injection-production process for CO₂ flooding in China's SINOPEC Shengli Oilfield[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2015, 11: 31-40.

第一作者: 马劲风(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 CO₂ 地质封存关键技术. jfma@nwu.edu.cn