

地质碳封存技术的环境效应与安全性评估

王 成

中国能源建设集团黑龙江省电力设计院有限公司 黑龙江 哈尔滨 150078

摘 要: 面对全球气候变化,减少温室气体排放成为国际共识,地质碳封存技术(GCS)作为关键减排手段,通过将二氧化碳注入地下以降低大气浓度。然而,GCS可能引发地下水、土壤、地质构造及生态系统的环境效应和安全问题。本文深入分析了这些潜在影响,包括对生态系统的影响及安全性评估,并提出监测与应对措施,旨在为GCS的合理应用与可持续发展提供科学依据,确保在实现碳减排的同时保护生态环境和人类安全。

关键词: 地质碳封存技术;环境效应;安全性评估;气候变化

1 引言

全球气候变化是人类面临的重大挑战,主要由温室气体排放引起。为应对这一问题,国际社会积极推广地质碳封存技术(GCS),通过捕获工业二氧化碳并注入地下咸水层或枯竭油气藏中实现长期封存,减少大气排放。GCS被视为关键的碳减排技术,具有显著潜力。然而,该技术可能带来环境影响和安全风险,因此在应用过程中需对其进行全面评估,确保不会对生态环境和人类社会造成不可接受的影响。深入研究其环境效应与安全性,对于实现可持续的碳减排目标至关重要。

2 地质碳封存技术概述

2.1 技术原理

地质碳封存技术主要基于二氧化碳在地下地质构造中的物理和化学特性。二氧化碳在常温常压下为气态,但在高压和低温条件下可以转化为液态或超临界状态。当二氧化碳被注入到地下合适的地质构造中时,它会受到上覆岩层的压力,处于超临界状态,具有类似液体的密度和类似气体的扩散性^[1]。这种状态的二氧化碳能够有效地填充地质构造中的孔隙空间,并通过物理吸附、溶解和化学反应等方式实现长期封存。

2.2 封存地质构造类型

(1) 咸水层:咸水层是地下深部富含盐水的多孔岩石层,具有巨大的封存潜力。其孔隙度和渗透率适中,能够容纳大量的二氧化碳,并且上覆有不透水的盖层,可防止二氧化碳向上泄漏。(2) 枯竭油气藏:已经开采完毕的油气藏具有良好的密封性和已知的地质结构,对二氧化碳的封存机制有较为深入的研究。利用枯竭油气藏进行碳封存,不仅可以实现碳减排,还能提高油气采收率(EOR),具有一定的经济效益。(3) 不可开采煤层:煤层对二氧化碳具有较强的吸附能力,将二氧化碳注入不可开采煤层,不仅可以封存二氧化碳,还能置换

出煤层中的甲烷,实现煤层气的增产。

2.3 技术流程

地质碳封存技术主要包括二氧化碳的捕获、运输和封存三个主要环节。在捕获环节,通过燃烧后捕获、燃烧前捕获或富氧燃烧等技术从工业排放源(如发电厂、钢铁厂等)中分离出二氧化碳。捕获后的二氧化碳经过压缩处理,形成高压液体或超临界流体,然后通过管道或船舶等方式运输到封存地点。在封存环节,将二氧化碳注入到选定的地下地质构造中,并进行长期的监测和管理,以确保封存的安全性和有效性。

3 地质碳封存技术的环境效应

3.1 对地下水的影响

一是水质变化:二氧化碳注入地下后,会与地下水发生化学反应,导致地下水的酸碱度(pH值)发生变化。二氧化碳溶于水形成碳酸,使地下水的酸性增强,可能会溶解地下水中的矿物质,如钙、镁等离子,从而改变地下水的化学成分。这种水质变化可能会影响地下水的使用价值,对依赖地下水的农业灌溉、工业生产和居民生活用水造成不利影响。二是地下水污染风险:如果二氧化碳泄漏到含水层中,可能会携带注入过程中使用的化学物质(如防腐剂、抑制剂等)一起进入地下水,导致地下水污染^[2]。此外,二氧化碳泄漏还可能改变地下水的氧化还原条件,促进地下水中某些有害物质的释放和迁移,进一步增加地下水污染的风险。

3.2 对土壤的影响

一是土壤酸化:二氧化碳泄漏到地表或浅层土壤中,会与土壤中的水分反应生成碳酸,导致土壤酸化。土壤酸化会影响土壤中微生物的活性和多样性,破坏土壤生态平衡。一些对酸敏感的微生物种类可能会减少或消失,而一些适应酸性环境的微生物可能会大量繁殖,从而改变土壤的微生物群落结构。二是土壤养分流失:土壤酸化还会加

速土壤中养分的淋溶作用,导致土壤中氮、磷、钾等养分元素的流失。这不仅会影响土壤的肥力,降低农作物的产量和质量,还可能导致水体富营养化等环境问题。

3.3 对地质构造的影响

一是地层压力变化:大量二氧化碳的注入会改变地下地质构造的压力分布。在注入初期,注入点附近的地层压力会迅速升高,可能导致地层微裂缝的扩展或新裂缝的产生。如果压力升高过大,还可能引发地震活动,尤其是当注入点位于地震活跃区或断层附近时,地震风险会显著增加。二是岩石力学性质改变:二氧化碳与地下岩石的长期相互作用可能会改变岩石的力学性质。例如,二氧化碳与岩石中的某些矿物发生化学反应,可能导致岩石的孔隙度和渗透率发生变化,影响岩石的强度和稳定性。这种岩石力学性质的改变可能会对地质构造的长期稳定性产生影响,增加地质灾害发生的可能性。

3.4 对生态系统的影响

一是地表植被影响:二氧化碳泄漏到地表可能会对地表植被造成直接危害。高浓度的二氧化碳可能会抑制植物的光合作用,影响植物的生长和发育。此外,土壤酸化和养分流失也会间接影响植被的生存环境,导致植被退化、生物多样性减少等问题^[3]。二是生态系统服务功能受损:地质碳封存技术可能引发的环境效应会对生态系统的服务功能造成损害。例如,地下水污染会影响水资源的供应和质量,影响农业灌溉和居民生活用水;土壤质量下降会影响农作物的产量和质量,威胁粮食安全;生物多样性减少会影响生态系统的稳定性和抵抗力,降低生态系统对环境变化的适应能力。

4 地质碳封存技术的安全性评估

4.1 潜在风险因素分析

(1) 泄漏风险:泄漏是地质碳封存技术面临的主要安全风险之一。泄漏可能发生在注入过程中,也可能发生在封存后的长期监测过程中。泄漏的原因包括地质构造的复杂性、封存设施的老化和损坏、人为操作失误等。二氧化碳泄漏到大气中会削弱碳封存的效果,而泄漏到地下环境则可能引发上述各种环境问题。(2) 诱发地震风险:如前文所述,大量二氧化碳的注入可能会改变地层压力,诱发地震活动。虽然目前对于二氧化碳注入诱发地震的机制和规律还缺乏深入的了解,但一些实际案例表明,在特定的地质条件下,二氧化碳注入确实有可能引发地震。地震的发生不仅会对封存设施造成破坏,还可能对周边地区的人员和财产安全构成威胁。

(3) 长期封存稳定性风险:地质碳封存技术要求二氧化碳在地下实现长期、稳定的封存,封存时间可能长达数

百年甚至上千年。然而,地质构造在漫长的地质历史时期内会发生变化,如地壳运动、岩层抬升等,这些变化可能会影响二氧化碳的封存稳定性。此外,未来人类活动(如地下资源开采、工程建设等)也可能对封存场地造成干扰,增加二氧化碳泄漏的风险。

4.2 监测技术与方法

为了及时发现和处理地质碳封存过程中可能出现的环境问题和安全风险,需要建立完善的监测体系。监测内容包括二氧化碳的分布和迁移、地下水和土壤质量变化、地层压力和地震活动等。(1) 地球物理监测:地球物理监测方法包括地震监测、重力监测、电磁监测等。地震监测可以实时监测地震活动,及时发现与二氧化碳注入相关的微地震事件;重力监测可以检测地下质量分布的变化,反映二氧化碳的注入和迁移情况;电磁监测可以探测地下电阻率的变化,用于识别二氧化碳泄漏通道^[4]。(2) 地球化学监测:地球化学监测主要通过地下水、土壤和气体样品的分析,检测其中二氧化碳浓度、化学成分和同位素组成的变化。例如,通过监测地下水中二氧化碳浓度和pH值的变化,可以判断是否存在二氧化碳泄漏;通过分析土壤中养分的含量和微生物群落结构的变化,可以评估土壤质量是否受到影响。(3) 直接监测:直接监测方法包括在注入井和监测井中安装传感器,实时监测二氧化碳的压力、温度、流量等参数。此外,还可以通过钻孔取样和测井等方法,直接获取地下岩石和流体的信息,了解二氧化碳的封存状态。

4.3 风险应对措施

(1) 选址优化:在地质碳封存项目选址阶段,应充分考虑地质构造的稳定性、盖层的密封性、地下水和土壤的敏感性等因素。选择地质条件优越、风险较低的地区作为封存场地,从源头上降低环境效应和安全风险。

(2) 工程设计与施工控制:在工程设计和施工过程中,应采用先进的技术和工艺,确保封存设施的质量和安全性。例如,优化注入井的设计和施工,提高井筒的密封性;采用合适的封存材料和技术,增强盖层的封存能力。同时,加强对施工过程的监督和管理,严格按照规范进行操作,避免因施工不当引发安全风险。(3) 应急预案制定:制定完善的应急预案,明确在发生二氧化碳泄漏、地震等突发事件时的应对措施和责任分工。应急预案应包括应急监测、人员疏散、泄漏控制、环境修复等内容,并定期进行演练和评估,确保在紧急情况下能够迅速、有效地采取行动,最大限度地减少损失。

5 国内外地质碳封存技术环境效应与安全性评估实践

5.1 国外实践案例

挪威Sleipner项目：挪威Sleipner项目是世界上第一个商业规模的海上咸水层碳封存项目，自1996年开始运行。该项目将天然气处理过程中产生的二氧化碳注入到北海Utsira砂岩咸水层中。通过对该项目的长期监测，发现二氧化碳在咸水层中实现了有效的封存，未发现明显的泄漏现象。监测结果表明，二氧化碳在咸水层中以超临界状态存在，并在重力作用下逐渐向下扩散，形成了稳定的封存体。同时，该项目对地下水和土壤的影响较小，未对周边生态环境造成明显的负面影响。

加拿大Weyburn项目：加拿大Weyburn项目是一个利用枯竭油气藏进行碳封存和提高油气采收率（EOR）的项目。该项目将二氧化碳从美国北达科他州的一家煤制气厂运输到加拿大萨斯喀彻温省的Weyburn油田进行注入。通过对该项目的监测和研究，发现二氧化碳在油气藏中实现了良好的封存效果，同时提高了油气的采收率。然而，该项目也发现了一些潜在的环境问题，如二氧化碳泄漏到浅层地下水中的风险。为了应对这一问题，项目方采取了一系列措施，如加强监测、优化注入工艺等，以确保封存的安全性。

5.2 国内实践案例

神华集团鄂尔多斯CCS示范项目：神华集团鄂尔多斯CCS示范项目是我国首个全流程示范项目，于2011年开始注入二氧化碳。该项目将煤制油过程中产生的二氧化碳捕获后，注入到地下咸水层中进行封存。通过对该项目的监测和评估，发现二氧化碳在咸水层中实现了有效的封存，封存效率较高。同时，项目对周边地下水和土壤的影响较小，生态环境状况良好。然而，该项目也面临着一些挑战，如地质构造的复杂性增加了监测和管理的难度。

吉林油田CCS-EOR项目：吉林油田CCS-EOR项目是

我国首个将碳封存与提高油气采收率相结合的项目。该项目将二氧化碳注入到枯竭油藏中，实现了二氧化碳的封存和油气的增产。通过对该项目的监测和研究，发现二氧化碳在油藏中能够有效地驱替原油，提高采收率。同时，项目对地下水和土壤的影响也在可控范围内。但该项目也需要注意二氧化碳泄漏和诱发地震等安全风险，加强监测和防范措施。

结语

地质碳封存技术是重要的碳减排手段，但可能引发地下水、土壤、地质构造的影响及泄漏、地震等风险。通过合理选址、优化设计、完善监测与应急预案可有效降低这些风险。未来，该技术在全球碳减排中的作用更加显著，需深入研究其环境效应与安全性，探索二氧化碳在地下的行为，提升捕获与封存效率。政府应出台支持政策，如审批制度和财政补贴，促进技术发展。国际合作也不可或缺，各国需共享经验，开展联合研究，共同推广此技术，确保其实现可持续发展，为应对全球气候变化做出贡献。

参考文献

- [1]陶盛,杜松,杨桔材,等.深部地质封存技术应用泄漏风险概率评估[J].中国煤炭地质,2025,37(01):62-68.
- [2]廖志伟,羊俊敏,钟翔宇,等.二氧化碳地质封存技术研究进展综述[J].地下空间与工程学报,2024,20(S1): 497-507.
- [3]张广奇,徐玉兵,刘曾奇,等.CO₂地质封存技术研究进展[J].当代化工研究,2024,(17):41-43.
- [4]包一翔,李井峰,郭强,等.二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述[J].煤炭科学技术,2022,50(06):84-95.