

玄武岩中二氧化碳原位矿化封存： 机遇和挑战

吴 迪, 蔡家铁*, 陈 博, 许 兴, 王若同, 潘 一

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年1月17日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月11日

摘要

CO₂的过量排放带来了严重的环境问题, CO₂封存技术作为CCUS技术的重要环节, 可以减少大气中的CO₂含量, 从而有效减缓全球气候变暖。本文综述了二氧化碳在玄武岩中封存的机理和技术挑战, 进一步了解玄武岩的矿物成分和固碳机理, 介绍了世界上已有的玄武岩CO₂封存工程冰岛CarbFix示范项目, 探讨了玄武岩CO₂原位矿化封存存在的若干问题及面对的挑战, 得出玄武岩CO₂原位矿化封存相比于常规的封存技术, 具有促进碳矿化、封存效果持久、安全以及较大的封存容量等显著优点, 为推动该领域进一步发展提供理论指导。

关键词

玄武岩, 二氧化碳, 原位矿化, 碳封存

In-Situ Mineralization and Storage of Carbon Dioxide in Basalt: Opportunities and Challenges

Di Wu, Jiatie Cai*, Bo Chen, Xing Xu, Ruotong Wang, Yi Pan

College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Jan. 17th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

The excessive emission of CO₂ has brought serious environmental problems. As an important part

*通讯作者。

of CCUS technology, CO₂ storage technology can reduce the CO₂ content in the atmosphere, effectively suppressing global climate change. This article summarizes the mechanism and technical challenges of carbon dioxide sequestration in basalt, further understanding the mineral composition and carbon sequestration mechanism of basalt. It introduces the CarbFix demonstration project of basalt CO₂ sequestration in Iceland, discusses several issues and challenges faced by *in-situ* mineralization sequestration of basalt CO₂, and concludes that compared with conventional sequestration technologies, *in-situ* mineralization sequestration of basalt CO₂ has obvious advantages such as promoting carbon mineralization, long-term and safe sequestration effects, and large sequestration capacity, providing theoretical guidance for further development in this field.

Keywords

Basalt, Carbon Dioxide, In-Situ Mineralization, Carbon Sequestration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大量温室气体排放对全球气候和环境的巨大影响引起了世界的广泛关注。工业生产和人类生活中消耗了大量化石燃料，必须开发二氧化碳减排技术，以将大气中的二氧化碳含量稳定在合理水平。碳捕集利用与封存(CCUS)技术不仅能改善全球气候变化，还被公认为实现CO₂净零排放的主要途径之一，是当前实现化石能源低碳化的唯一选择[1]。

传统地质封存的另一种替代方法是碳矿化，即二氧化碳与金属阳离子反应形成碳酸盐矿物。二氧化碳矿物碳酸化(矿化)作为一种替代的二氧化碳封存策略的概念是由 Seifritz [2]首先提出的。矿物碳酸化有两种方法：原位和非原位。原位方法包括通过注入二氧化碳来生产碳酸盐，而原位方法是在工业工厂使用先前开采或当地岩石进行的[3]。在富含镁、铁和硅酸钙的玄武岩或蛇绿岩岩石中，通常会考虑原位矿物碳酸化[4]。原位矿物碳化法的主要优点在于不需要广泛的开采，因为该过程只需要少数钻孔[5]。在非原位矿化过程中，碳化反应发生在地面上，利用水泥基建材中含有的硅酸盐和有矿化活性的水化产物吸收CO₂。

大量从孔隙到现场的实验和模拟研究结果表明，玄武岩矿化封存CO₂速率受多种因素影响[6]，主要包括pH值、温度和压力等在内的多种储层环境条件影响，增加了固碳反应的复杂性。当pH值降低时，溶液中的H⁺浓度增加，促进玄武岩矿物的溶解，从而提高二氧化碳在玄武岩中的矿化封存速率。在高温条件下会导致平衡向生成碳酸盐沉淀的方向偏移，增加玄武岩矿物的溶解速率，有利于二氧化碳的矿物封存。在高压条件下，二氧化碳分子更密集，与矿物表面接触的机会增加，二氧化碳与岩石中的矿物之间的作用力增强，反应速率相应增加，有助于促进二氧化碳的吸附和矿化封存。Gislason等[7]在构成玄武岩的单一矿物与缓冲溶剂的反应速率模型的基础上，提出不同温度下玄武岩样品在超临界二氧化碳水溶液中的矿化封存速率模型，同时使用模型计算值与实验值对模型进行验证，结果证明了模型的准确性和可靠性，研究结果可直接应用于二氧化碳地质封存条件下玄武岩封存速率的计算。温度可影响矿物溶解和沉淀过程中相变过程和晶体结构，从而提高次生矿物稳定性和封存效率。研究表明，随着反应温度的上升，玄武岩矿化封存速率随之提高[8]。Liu等人[9]还发现在一定的压力条件下，提高反应温度可提升橄榄石和斜长石反应速率。且碳酸盐岩的溶解度会随着温度的升高而逐渐降低。压力可增加CO₂在水中的溶解度，提升其矿化封存效率。一般认为压力越大，固碳矿物的反应性越强，矿化封存速率越高，

甚至形成的矿物类型也不一样。Santos R M 等[10]开发了一种新型“二氧化碳能量反应器”，重力压力容器，是由三个同心管组成的活塞式高压釜，反应器安装在深 1200 米的钻井中，占地面积小，利用天然静水压力和地热来活化矿物浆液，静水压力可达到 120 bar，最高温度可达 300°C，且反应过程中的热量可以循环利用，停留时间最长约 90 分钟，可以实现较高的矿化封存速率。Oelkers 等人[11]研究了玄武岩中二氧化碳矿物封存的热力学和动力学基础，以及如何优化其封存速率促进封存。将二氧化碳气体溶解到水相中，一旦气体完全溶解，水的密度就会增加，从而最大限度地减少其流向地球表面的趋势。实验和现场证据表明，限制硅酸盐岩石中碳固矿速率的因素是硅酸盐矿物和玻璃中二价阳离子的释放速率。

玄武岩 CO₂ 地质封存理论已受到广泛关注，前人已进行了大量研究[12]，这些成果使玄武岩 CO₂ 地质封存成为唯一经过现场试验和示范验证的有效方法[13]，对今后实现碳中和目标具有重要战略意义。在这样的背景下，研究玄武岩 CO₂ 原位矿化封存理论方面对于推动该领域进一步研究必然会有帮助。

2. 原位矿物碳化

原位矿物碳酸化是地质封存的一个方法，注入的二氧化碳可以与天然产生的矿物发生反应生成沉淀，形成各种固体碳酸盐矿物，该方法会提高注入的二氧化碳的长期稳定性。原位矿物碳酸化克服了非原位矿物过程的一些局限性，二氧化碳被直接注入地下的多孔岩石中，可以直接与岩石发生反应。

碳矿化是储存大气中二氧化碳的全球碳循环的一个关键过程。由此产生的碳酸盐岩矿物是稳定的，并在地质时间尺度上提供了低环境风险的存储[14]。由于玄武岩二价阳离子含量高，是碳矿化的重要要求，而二氧化硅含量低，它为注入二氧化碳提供了一个理想的储存环境[15]。

原位矿物碳酸化二氧化碳存储应该评估作为替代迁地方法，因为它利用固有的化学势能构造暴露地幔橄榄岩在地球表面，不需要广泛的运输和处理固体反应物，并需要更少的能量来保持最佳温度和压力[16]。Matter 和 Kelemen [17]利用天然类似物通过矿物碳化研究了油藏中二氧化碳的永久封存。研究结果表明，在富含含镁和含钙矿物质的宿主岩石中，矿化率很高。碳酸盐岩矿物的沉淀可以堵塞预先存在的孔隙，尽管快速沉淀引起的应力也可能导致压裂和孔隙体积的增加。

原位矿物碳化涉及到将二氧化碳注入地质地层，而非原位碳化涉及到二氧化碳承载矿物的形成，这是地球表面工业过程的一部分[18]。矿物碳酸化需要将二氧化碳与金属结合形成碳酸盐矿物。除了少数例外，所需的金属是二价阳离子，包括 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe²⁺。这一过程中最丰富的阳离子来源是硅酸盐矿物和玻璃质。现场和实验证据表明，在玄武岩等硅酸盐岩中，最慢的速率限制步骤是硅酸盐矿物和玻璃质的溶解，释放二价阳离子[7]。

原位矿物碳化采用了二次捕获机理，包括储液流体中溶解二氧化碳的溶解度捕获，毛细管力捕获毛细管，以及流体 - 岩石相互作用的矿化根据地质和操作条件导致二氧化碳捕获。与硅酸盐矿物捕获的沉积地层相比，在合适的火成岩，如玄武岩中注入二氧化碳可以产生快速的矿物碳酸化。其目的是加速一个自然过程，数百万年来在岩石中进行的大量碳储存，其速度足以有助于缓解气候变化。用这种方法，捕获的二氧化碳注入反应岩石，包含高浓度的二价阳离子，如 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe²⁺，快速矿化方解石(碳酸钙)，白云石(CaMg(CO₃)₂)或菱镁矿(碳酸镁)，这些矿物的形成可以大大提高注入的二氧化碳的稳定性。

3. 玄武岩

从技术上讲，玄武岩被认为是良好的二氧化碳储存地点，因为：(1) 它们在世界范围内广泛存在[19]，约 5% 的大陆和大部分海底由玄武岩组成，(2) 与其他硅酸盐岩石的矿化能力相比，良好的矿化能力[20]，(3) 碳酸盐岩快速矿化导致的泄漏风险低[21]。

尽管地球大陆表面只有不到 10% 被玄武岩覆盖[22]（见图 1），详细全球主要的玄武岩省份见表 1。例

如，美国 Columbia River 玄武岩的体积超过 $2 \times 10^5 \text{ km}^3$ ，西伯利亚玄武岩的体积超过 $1 \times 10^6 \text{ km}^3$ 。这些玄武岩具有相应的较大的二氧化碳封存能力[23]：McGrail 等人[24]估计，仅 Columbia River 玄武岩就有能力封存超过 100 Gt 的二氧化碳。

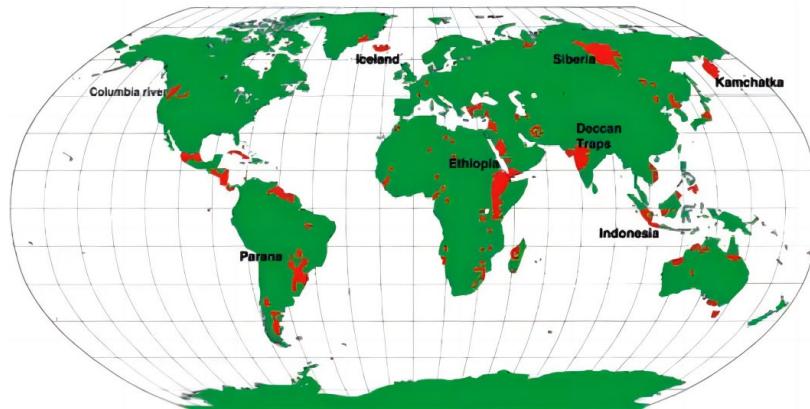


Figure 1. Distribution map of major basalt provinces in the world
图 1. 全球主要的玄武岩省份分布图

Table 1. Major basaltic provinces around the globe

表 1. 全球主要玄武岩省份

省份	位置	面积(km^2)	体积(km^3)
Columbia River Basalt Group	Northwestern U.S.	20,000	224,000
Emeishan basalts	Southwest China	>250,000	>300,000
Decan Traps	India and Pakistan	60,000	512,000
Kerguelen Plateau	Southern Indian Ocean	2,300,000	9,100,000
Keweenawan Basalts	Northcentral U.S.	160,000	640,000
North Atlantic Volcanic Province	UK and Greenland	1,300,000	6,600,000
Ontong Java Plateau	Southwestern Pacific	1,900,000	44,400,000
Parana-Etendeka Province	Brazil, Namibia and Angola	2,200,000	>1,000,000
Siberian Traps	Eastern Siberia	340,000	400,000
Yemen-Ethiopian Traps	Yemen and Ethiopia	>600,000	>350,000

3.1. 玄武岩封存机理

沉积盆地中的碳储存是通过将纯二氧化碳注入多孔沉积岩中进行的[25]。理想情况下，这个二氧化碳被困在一个不透水的帽状岩石下面[26]。随着从结构捕获到矿物捕获，二氧化碳更加稳定，因此存储更安全，尽管这个过程可能需要数千年或更长的时间[27]。在碳固定法中，二氧化碳在注入多孔玄武岩的过程中被溶解到水中[28]，由于溶解的二氧化碳没有浮力，也不需要迁移回地面[29]。

沉积地层的矿物组成也有显著变化[30]。玄武岩中的碳矿化是另一种潜在的二氧化碳储存技术[31]，不受沉积地层的限制[32]。其想法是捕获二氧化碳并将其注入活性岩石中形成稳定的碳酸盐[20]，也称为原位矿化方法[33]。该方法的主要优点是由于二氧化碳快速转化为稳定的碳酸盐矿物(矿物捕获)，泄漏风险低。

二氧化碳在水相中的溶解促进了矿物的储存[34]。这种溶解所需的水量随着温度的降低、盐度的降低和压力的增加而减少[33]。实验和现场证据表明，限制硅酸盐岩石中碳固矿速率的因素是硅酸盐矿物和玻璃中二价阳离子的释放速率，一旦气体完全溶解，水的密度就会增加，从而最大限度地减少二氧化碳流向地面的趋势。2010年，通过在冰岛西南部海里海蒂遗址的玄武岩中注入二氧化碳，来测试在玄武岩中通过碳化固定二氧化碳的可行性[35]。

Goldberg等人[11]研究了深海玄武岩中的二氧化碳注入，发现在相对较短的地质时间内形成稳定的碳酸盐，并延迟二氧化碳返回大气；提供足够的深度，使密度更大的二氧化碳液体下沉；停止酸化基底流体通过不渗透的沉积物覆盖层向上迁移；当二氧化碳逃逸到温度较低的浅深处时，形成稳定的水合物。值得注意的是，在有限数量下的稀疏和罕见的二氧化碳泄漏并不一定会影响海底环境[36]。

Oelkers等人[23]研究了玄武岩中二氧化碳矿物储存的热力学和动力学基础，以及如何优化其储存方法。将二氧化碳气体溶解到水相中，促进了矿物的储存。一旦气体完全溶解，水的密度就会增加，从而最大限度地减少其流向地球表面的趋势。实验和现场证据表明，限制硅酸盐岩石中碳固矿速率的因素是硅酸盐矿物和玻璃中二价阳离子的释放速率。玻璃态的超镁铁岩和玄武岩由于其相对较快的溶解速率、高浓度的二价阳离子和地球表面的丰度，是二氧化碳最有前途的岩石类型。

二氧化碳可直接注入玄武岩或溶解在水中[37]。这一过程始于二氧化碳在水中的溶解和碳酸的形成，碳酸是压力、温度和盐度的函数。碳酸降低了原位水的pH值[18]，并增加了其反应性。因此， H^+ 离子开始进入玄武岩，溶解岩石基质中的主要矿物，释放阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+})到溶液中[38]。

一些硅酸盐矿物和玻璃质玄武岩含有大量碳酸盐岩形成所需的金属，因此是原位封存碳矿物的宿主地层[39]。表2列出了在二氧化碳注入后引发快速碳酸化的潜在矿物列表[23]。表3给出了玄武岩中二氧化碳储存产生的碳酸盐矿物的质量[34]。

Table 2. Potential minerals for carbon mineralization in basalt

表2. 玄武岩中潜在的碳矿化矿物

矿物	化学式	封存1吨碳所需的吨数/t
硅灰石	$CaSiO_3$	9.68
镁橄榄石	Mg_2SiO_4	5.86
蛇纹石	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	7.69
钙长石	$CaAl_2Si_2O_8$	23.1
玄武岩	$Al_{0.36}Fe(III)_{0.02}SiTi_{0.02}O_{3.45}$	8.67

Table 3. Carbonate minerals produced upon CO_2 storage in basalt

表3. 玄武岩中二氧化碳封存产生的碳酸盐矿物

矿物	化学式	每吨碳的产量/t	体积/ m^3
方解石	$CaCO_3$	8.34	3.08
菱镁矿	$MgCO_3$	7.02	2.36
片钠铝石	$NaAlCO_3(OH)_2$	12.00	4.95
菱铁矿	$FeCO_3$	9.65	2.49
铁白云石	$Ca(Fe,Mg)(CO_3)_2$	8.60	2.81

目前已经进行了许多实验和数值研究来了解二氧化碳注入玄武岩所造成的相互作用，当二氧化碳注入玄武岩后，不同水基质生成的碳酸盐沉淀和所需时间不同，近十年不同水相条件下二氧化碳与玄武岩的相互作用的研究如表 4 所示。

Table 4. Study on the interaction between CO₂ and basalt under different water phase conditions
表 4. 不同水相条件下 CO₂ 与玄武岩相互作用的研究

水相	温度/℃	压力/MPa	时间	pH	封存速率/%	反应产物	结论
纯水	250	50	3 个月	7	40	碳酸 (H ₂ CO ₃)	反应速率较慢，碳酸形成后进一步与矿物反应
海水	50	1	56 天	7	65	碳酸氢钠 (NaHCO ₃)	盐水中的离子促进反应，生成碳酸盐更为有效
酸性水	36	7.7	2 年	4	80	碳酸氢根 (HCO ₃ ⁻)	低 pH 条件下，矿物溶解加速，有利于碳酸盐形成
碱性水	45	10	6 周	9	35	碳酸氢根 (HCO ₃ ⁻)	高 pH 条件下，CO ₂ 更容易转化为碳酸盐
天然地下水	100	10	40 周	-	-	多种碳酸盐 (如钙、镁、铁碳酸盐)	地下水中的矿物质促进多种碳酸盐的形成
含有机物的水	150	15	32 天	-	-	有机酸 (如乙酸、乳酸)	有机物分解产生酸，促进矿物溶解和碳酸盐形成
高温高压水	25	0.101	2 个月	7	38	高温高压条件下的多种碳酸盐	高温高压条件下反应速率显著提高

由此可见，玄武岩矿物的 CO₂ 矿化封存速率与 pH 有关。二氧化碳与不同水基质反应，在不同的温度和压力条件下生成沉淀不同，以及反应的速率和时间也不同。低温条件下矿物碳酸化，需要调整初始二氧化碳供应、岩水比和 pH 之间的精细平衡，以便在合理的时间尺度上有效地矿化二氧化碳。高温高压条件结合适当的 pH (如中性或略碱性) 是实现高效碳封存的最佳条件。这些条件下，矿化封存速率最快，碳酸盐沉积量最大。极端高温高压(如 200℃ 和 50 MPa) 和高 pH 条件下，碳酸盐形成效率达到最高，有利于长期碳封存，但当温度升高到一定值时，二氧化碳封存速率达到稳定，则无需继续提高温度。

CO₂ 与岩石的化学反应生成碳酸盐的过程包括 CO₂ 溶解于水溶液(式 1)、岩石溶解并释放二价金属阳离子(式 2 和 3)，以及碳酸根离子与二价阳离子反应生成沉淀物(式 4)。

Table 5. Chemical reactions in basalts upon CO₂ injection
表 5. 注入二氧化碳后玄武岩中的化学反应

化学反应	反应
$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	(1)
$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 4\text{H}^+ = 2(\text{Mg}, \text{Fe})^{2+} + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	(2)
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	(3)
$(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Fe})^{2+} + \text{HCO}_3^- = (\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Fe})\text{CO}_3 + \text{H}^+$	(4)

相关的流体和矿物反应可以表述如下，二氧化碳溶解在水中形成酸性溶液。岩石溶解释放二价阳离子，在液体中饱和后，释放的二价阳离子与溶解的二氧化碳反应形成稳定的碳酸盐矿物，如菱镁矿($MgCO_3$)、菱铁矿($FeCO_3$)和方解石($CaCO_3$)，反应如表5所示。

研究表明，影响上述反应速率的因素包括盐度、温度、压力、pH值、流体流速和矿物表面积等[16]。李晓媛等[40]通过溶解试验分析了 CO_2 矿化封存条件下玄武岩的溶解反应速率，并建立了相关模型。结果表明，搅拌可以显著加快溶解反应速率(约为200%)。

3.2. CarbFix 项目

截至目前，已知全球有三个工程示范项目进行了玄武岩 CO_2 封存试验，原位矿化封存示范项目见表6[41]。

Table 6. *In-situ* mineralization and storage demonstration project

表6. 原位矿化封存示范项目

项目名称	目标储层	CO_2 相态	运营情况	总 CO_2 封存量	转化率
Nagaoka	砂岩含水层 (1100 m)	超临界	2003~2005年注入 CO_2 ；目前只用于监测地下活动	10405吨	—
Wallula	大陆溢流玄武岩 (800~900 m)	超临界	2009年开展项目，主要是地下地质表征；2013年7~8月注入 CO_2 ；2015年停止运营	每天 CO_2 注入不超过40吨，共计1000吨	60%
CarbFix	玄武岩 (400~800 m)	CO_2 饱和溶液	CarbFix1：2012~2016年 CarbFix2：2014年~至今	目前每年 CO_2 注入6500吨，总容量预计0.33亿吨	95%

在上述项目中，除CarbFix项目外，其他项目均已停止实验，CarbFix项目进展较大且仍在继续。表6概述了上述原位矿化封存示范项目的实施情况。Oelkers等人为CarbFix项目提供了早期参考[42]，以研究玄武岩中原位二氧化碳矿化的可行性。玄武岩的碳酸化是通过热液蚀变、地表风化和 CO_2 -水-岩石反应发生的，其中二价阳离子在溶液中释放并增加碱度，全球玄武岩的天然碳化每年消耗 1.8×10^8 吨二氧化碳。

CarbFix是一个工业-学术联合试点项目，目的是评估在玄武岩中原位二氧化碳矿物封存的可行性。CarbFix独特的特点是它与Hellisheiði地热发电厂的连接，除了二氧化碳运输和矿物封存外，还可以捕获其他排放的二氧化碳。CarbFix项目的成功推动了其升级为CarbFix2并持续推进。CarbFix2是二期项目，注入井(HN-16)位于地堑构造西侧，目标储层深度大幅提升，由交替出现的玄武碎屑岩和熔岩组成。侵入岩在约800m深度以下切割玄武碎屑岩，并在1700m以下占主导地位，极大地影响地下岩层的渗透性，裂隙网络是500m以下含水层渗透性的主要控制因素。2000m深度岩层的温度范围为220°C~260°C。一些学者认为，约185°C的温度最适合地下矿物形成碳酸盐，且推荐注入深度在地下1200~1900m之间[43]。

CarbFix方法的进一步应用可能最好地应用于在海底储存二氧化碳[44]，因为海底有丰富的多孔玄武岩，毗邻几乎取之不尽的海水供应[45]。据估计，超过10万吨的二氧化碳可以储存在世界海洋中脊[46]。作为目前欧盟资助的CarbFix2项目的一部分，未来需开发通过向地下注入充满二氧化碳的海水来在海底玄武岩中储存二氧化碳的技术。CarbFix2项目进一步涉及到从环境空气中捕获二氧化碳，作为玄武岩中后续永久矿物存储的来源。据估算，Carbfix2项目CCS的总体成本为25~50美元/吨[47]，如表7所示。

Table 7. CarbFix project storage cost
表 7. CarbFix 项目封存成本

	Hellisheiði 电厂现场成本	Hellisheiði 电厂现场 钻井成本	Hellisheiði 发电厂钻井和 使用工业电价的现场成本
捕获	21.3	21.3	42.1
运输	1.3	1.3	1.3
注入	1.3	4.1	4.1
监控	0.9	0.9	0.9
总成本	24.8	27.6	48.4

常规技术(如注入驱油驱气和深部咸水层封存)包含的二氧化碳(纯净、干燥)捕集与封存(CCS)的总成本可达 38~143 美元/吨[48]。因此, 玄武岩 CO₂ 地质封存相对于其他 CO₂ 捕集与封存(CCS)也具有一定成本优势。

4. 挑战和结论

为了实现碳达峰碳中和目标, 必须要清除更多的 CO₂, 玄武岩 CO₂ 原位矿化封存是一种可供选择的较为理想的长期解决方案, 通过本文对玄武岩 CO₂ 原位矿化封存的研究, 可以得出:

(1) 原位矿化封存技术的目标是将 CO₂ 永久封存于活性岩石中, 避免大规模开采、运输和处理固体反应物的成本和步骤, 从而形成一种经济、安全、持久的碳封存模式, 为实现碳中和目标做出重要贡献。

(2) 玄武岩 CO₂ 原位矿化封存作为地球科学中前沿的新兴研究领域, 对全球实现碳达峰和碳中和目标具有潜在的战略意义。首先, 玄武岩在地球上的广泛分布和巨大的封存容量为该技术提供了支持; 其次, 该方法 CO₂ 泄漏的可能性极低, 存储既安全又持久。

(3) 原位矿化封存具有巨大潜力, 但由于自然环境的复杂性, 精确控制矿化反应的最佳条件和关键参数具有极大难度。提升矿化反应的速率和效率仍是未来工作的重点。尽管玄武岩 CO₂ 原位矿化封存已在理论研究和现场试验中取得了一定进展, 但在实践中仍面临诸多问题, 尤其需要开展更大规模的示范工程进行验证。

(4) 尽管该方法有助于减少大气中的 CO₂ 浓度, 缓解气候变化, 但在封存过程中也可能面临一些环境风险。玄武岩的矿物反应过程是缓慢的, 可能需要数十年甚至几百年才能完全转化为稳定的碳酸盐矿物。在此期间, 若封存过程中发生变化或操作不当, 可能导致二氧化碳的暂时储存不稳定, 增加泄漏风险。并且注入二氧化碳的过程可能导致地下压力变化, 如果岩层中的孔隙结构或裂隙出现变动, 可能诱发微小或较大的地震, 称为诱发地震。尤其是在深层岩层注入二氧化碳时, 可能会影响到断层的稳定性。因此, 玄武岩封存二氧化碳的环境风险需要通过严密的监测、科学的评估和有效的管理措施来减轻。

致 谢

感谢辽宁省教育厅给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 秦积舜, 李永亮, 吴德彬, 等. CCUS 全球进展与中国对策建议[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(1): 20-28.
- [2] 高志豪, 夏菖佑, 廖松林, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化封存潜力评估方法研究现状及展望[J]. 高校地质学报, 2023, 29(1): 66-75.
- [3] Assima, G.P., Larachi, F., Molson, J. and Beaudoin, G. (2014) Impact of Temperature and Oxygen Availability on the

- Dynamics of Ambient CO₂ Mineral Sequestration by Nickel Mining Residues. *Chemical Engineering Journal*, **240**, 394-403. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.010>
- [4] Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R. and Maroto-Valer, M.M. (2014) A Review of Mineral Carbonation Technologies to Sequester CO₂. *Chemical Society Reviews*, **43**, 8049-8080. <https://doi.org/10.1039/c4cs00035h>
- [5] Kelemen, P., Benson, S.M., Pilorgé, H., Psarras, P. and Wilcox, J. (2019) An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, **1**, Article 9. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00009>
- [6] Matter, J.M., Broecker, W.S., Stute, M., Gislason, S.R., Oelkers, E.H., Stefánsson, A., et al. (2009) Permanent Carbon Dioxide Storage into Basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland. *Energy Procedia*, **1**, 3641-3646. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.160>
- [7] Gislason, S.R. and Oelkers, E.H. (2003) Mechanism, Rates, and Consequences of Basaltic Glass Dissolution: II. An Experimental Study of the Dissolution Rates of Basaltic Glass as a Function of Ph and Temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 3817-3832. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(03\)00176-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(03)00176-5)
- [8] Power, I.M., Wilson, S. and Dipple, G.M. (2013) Serpentinite Carbonation for CO₂ Sequestration. *Elements*, **9**, 115-121. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.115>
- [9] Liu, M., Asgar, H., Seifert, S. and Gadikota, G. (2020) Novel Aqueous Amine Looping Approach for the Direct Capture, Conversion and Storage of CO₂ to Produce Magnesium Carbonate. *Sustainable Energy & Fuels*, **4**, 1265-1275. <https://doi.org/10.1039/c9se00316a>
- [10] Santos, R.M., Knops, P.C.M., Rijnsburger, K.L. and Chiang, Y.W. (2016) CO₂ Energy Reactor—Integrated Mineral Carbonation: Perspectives on Lab-Scale Investigation and Products Valorization. *Frontiers in Energy Research*, **4**, Article 5. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00005>
- [11] Goldberg, D.S., Takahashi, T. and Slagle, A.L. (2008) Carbon Dioxide Sequestration in Deep-Sea Basalt. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 9920-9925. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804397105>
- [12] 张舟, 张宏福. 基性、超基性岩: 二氧化碳地质封存的新途径[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(1): 156-162.
- [13] Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Sigfusson, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S.R. and Oelkers, E.H. (2020) Carbon Dioxide Storage through Mineral Carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, **1**, 90-102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
- [14] Gislason, S.R., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Oelkers, E.H., Gunnlaugsson, E., Sigurdardottir, H., et al. (2010) Mineral Sequestration of Carbon Dioxide in Basalt: A Pre-Injection Overview of the CarbFix Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>
- [15] McGrail, B.P., Schaeff, H.T., Ho, A.M., Chien, Y., Dooley, J.J. and Davidson, C.L. (2006) Potential for Carbon Dioxide Sequestration in Flood Basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**, B12201. <https://doi.org/10.1029/2005jb004169>
- [16] Kelemen, P.B. and Matter, J. (2008) *In situ* Carbonation of Peridotite for CO₂ Storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 17295-17300. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105>
- [17] Matter, J.M. and Kelemen, P.B. (2009) Permanent Storage of Carbon Dioxide in Geological Reservoirs by Mineral Carbonation. *Nature Geoscience*, **2**, 837-841. <https://doi.org/10.1038/ngeo683>
- [18] Matter, J.M., Broecker, W.S., Stute, M., Gislason, S.R., Oelkers, E.H., Stefánsson, A., et al. (2009) Permanent Carbon Dioxide Storage into Basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland. *Energy Procedia*, **1**, 3641-3646. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.160>
- [19] Takaya, Y., Nakamura, K. and Kato, Y. (2013) Geological, Geochemical and Social-Scientific Assessment of Basaltic Aquifers as Potential Storage Sites for CO₂. *Geochemical Journal*, **47**, 385-396. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0255>
- [20] Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E.H., Mesfin, K., Aradóttir, E.S., Dideriksen, K., Gunnarsson, I., et al. (2017) The Chemistry and Saturation States of Subsurface Fluids during the *In Situ* Mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix Site in SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **58**, 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.01.007>
- [21] Xiong, W., Wells, R.K., Menefee, A.H., Skemer, P., Ellis, B.R. and Gianniaro, D.E. (2017) CO₂ Mineral Trapping in Fractured Basalt. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **66**, 204-217. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.10.003>
- [22] Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L.M. and Allègre, C.J. (2003) Basalt Weathering Laws and the Impact of Basalt Weathering on the Global Carbon Cycle. *Chemical Geology*, **202**, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001>
- [23] Oelkers, E.H., Gislason, S.R. and Matter, J. (2008) Mineral Carbonation of CO₂. *Elements*, **4**, 333-337.

<https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.333>

- [24] McGrail, B., Ho, A., Reidel, S. and Schaeff, H. (2003) Use and Features of Basalt Formations for Geologic Sequestration. In: Gale, J. and Kaya, Y., Eds., *Greenhouse Gas Control Technologies—6th International Conference*, Elsevier, 1637-1640. <https://doi.org/10.1016/b978-008044276-1/50264-6>
- [25] Lackner, K.S., Wendt, C.H., Butt, D.P., Joyce, E.L. and Sharp, D.H. (1995) Carbon Dioxide Disposal in Carbonate Minerals. *Energy*, **20**, 1153-1170. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00071-n](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00071-n)
- [26] Gunter, W.D., Perkins, E.H. and McCann, T.J. (1993) Aquifer Disposal of CO₂-Rich Gases: Reaction Design for Added Capacity. *Energy Conversion and Management*, **34**, 941-948. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90040-h](https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90040-h)
- [27] Kheshgi, H., de Coninck, H. and Kessels, J. (2012) Carbon Dioxide Capture and Storage: Seven Years after the IPCC Special Report. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **17**, 563-567. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9391-5>
- [28] Clark, D.E., Gunnarsson, I., Aradóttir, E.S., Þ. Arnarson, M., Þorgeirsson, Þ.A., Sigurðardóttir, S.S., et al. (2018) The Chemistry and Potential Reactivity of the CO₂-H₂S Charged Injected Waters at the Basaltic CarbFix2 Site, Iceland. *Energy Procedia*, **146**, 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.016>
- [29] Gislason, S.R. and Oelkers, E.H. (2014) Carbon Storage in Basalt. *Science*, **344**, 373-374. <https://doi.org/10.1126/science.1250828>
- [30] Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Bing, C.H., Nagarajan, R. and Hamid, M.A. (2016) A Screening Criterion for Selection of Suitable CO₂ Storage Sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **28**, 317-327. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.053>
- [31] Wigand, M., Carey, J.W., Schütt, H., Spangenberg, E. and Erzinger, J. (2008) Geochemical Effects of CO₂ Sequestration in Sandstones under Simulated In Situ Conditions of Deep Saline Aquifers. *Applied Geochemistry*, **23**, 2735-2745. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.06.006>
- [32] Kelemen, P., Benson, S.M., Pilorgé, H., Psarras, P. and Wilcox, J. (2019) An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, **1**, Article 9. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00009>
- [33] Yadav, S. and Mehra, A. (2021) A Review on Ex Situ Mineral Carbonation. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 12202-12231. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12049-4>
- [34] Metz, B., Davidson, O., Coninck, H.D., et al. (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- [35] Gislason, S.R., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Oelkers, E.H., Gunnlaugsson, E., Sigurdardottir, H., et al. (2010) Mineral Sequestration of Carbon Dioxide in Basalt: A Pre-Injection Overview of the CarbFix Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>
- [36] Gislason, S.R. and Oelkers, E.H. (2014) Carbon Storage in Basalt. *Science*, **344**, 373-374. <https://doi.org/10.1126/science.1250828>
- [37] Kelektsgoglou, K. (2018) Carbon Capture and Storage: A Review of Mineral Storage of CO₂ in Greece. *Sustainability*, **10**, Article 4400. <https://doi.org/10.3390/su10124400>
- [38] Ge, J., Zhang, X., Othman, F., Wang, Y., Roshan, H. and Le-Hussain, F. (2020) Effect of Fines Migration and Mineral Reactions on CO₂-Water Drainage Relative Permeability. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **103**, Article 103184. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103184>
- [39] Raza, A., Glatz, G., Gholami, R., Mahmoud, M. and Alafnan, S. (2022) Carbon Mineralization and Geological Storage of CO₂ in Basalt: Mechanisms and Technical Challenges. *Earth-Science Reviews*, **229**, Article 104036. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104036>
- [40] 李晓媛, 常春, 于青春. CO₂矿化封存条件下玄武岩溶解反应速率模型[J]. 现代地质, 2013, 27(6): 1477-1483.
- [41] McGrail, B.P., Schaeff, H.T., Spane, F.A., Cliff, J.B., Qafoku, O., Horner, J.A. et al. (2016) Field Validation of Super-critical CO₂ Reactivity with Basalts. *Environmental Science & Technology Letters*, **4**, 6-10. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00387>
- [42] Oelkers, E.H. and Cole, D.R. (2008) Carbon Dioxide Sequestration a Solution to a Global Problem. *Elements*, **4**, 305-310. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.305>
- [43] 吾尔娜, 吴昌志, 季峻峰, 等. 松辽盆地徐家圈子断陷玄武岩气藏储层的 CO₂ 封存潜力研究[J]. 高校地质学报, 2012, 18(2): 239-247.
- [44] Gunnarsson, I., Aradóttir, E.S., Oelkers, E.H., Clark, D.E., Arnarson, M.Þ., Sigfusson, B., et al. (2018) The Rapid and Cost-Effective Capture and Subsurface Mineral Storage of Carbon and Sulfur at the CarbFix2 Site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **79**, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>

-
- [45] Wolff-Boenisch, D., Wenau, S., Gislason, S.R. and Oelkers, E.H. (2011) Dissolution of Basalts and Peridotite in Seawater, in the Presence of Ligands, and CO₂: Implications for Mineral Sequestration of Carbon Dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**, 5510-5525. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.004>
 - [46] Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármansson, H., Einarsson, G.M. and Gislason, S.R. (2014) CO₂ Storage Potential of Basaltic Rocks in Iceland and the Oceanic Ridges. *Energy Procedia*, **63**, 4585-4600. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.491>
 - [47] Energy Futures Initiative (EFI) (2020) Rock Solid: Harnessing Mineralization for Large-Scale Carbon Management. Energy Futures Initiative (USA), 1-47.
 - [48] Rubin, E.S., Davison, J.E. and Herzog, H.J. (2015) The Cost of CO₂ Capture and Storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **40**, 378-400. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>