

玄武岩 CO₂ 地质封存研究进展

李万伦, 陈晶, 贾凌霄, 马冰, 陈扬, 孙君一

中国地质调查局地学文献中心, 北京, 100083



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

内容提要:玄武岩 CO₂地质封存相比于常规的封存技术(如驱油驱气注入封存和深部咸水层封存),具有能促进快速碳化、封存效果长久且安全及封存容量巨大等明显优点。目前玄武岩 CO₂封存理论方面的研究已经取得了大量进展:①对常见主要成岩矿物的封存能力进行了排序;②进一步了解玄武岩的矿物成分、玄武岩层内孔隙分布特征及其形成机理;③完善了对玄武岩 CO₂封存机理、反应速率及影响因素等方面的认识;④查明了玄武岩在地球上的分布并评估了各种典型玄武岩的封存潜力;⑤发现适合于 CO₂封存的场地主要包括大陆溢流型玄武岩、洋底高原玄武岩和洋中脊玄武岩等三种类型,并对目标储层选择提出了初步评价标准。本文在综述玄武岩固碳机理、玄武岩 CO₂地质封存潜力及封存场地与目标储层选择的基础上,介绍了世界上已有的三个玄武岩 CO₂地质封存工程示范项目:冰岛 Carbfix、美国 Wallula 和日本 Nagaoka,探讨了玄武岩 CO₂地质封存存在的若干问题:①反应速率受多种因素影响,对最终封存效果起着决定性作用;②堵塞或压裂和保护层会影响注入封存的稳定性或可持续性;③封存潜力评价方法和结果不同;④封存场地选址和储层选择缺乏统一标准与规范;⑤ Carbfix 方法的使用受限。

关键词:玄武岩;二氧化碳;封存机理;反应速率;封存场地;目标储层;封存方法

《巴黎协定》(UNFCCC, 2016)提出,到 21 世纪末,必须把全球变暖控制在 2℃以下,并努力将温度上升幅度限制在 1.5℃以内;只有这样才能避免最恶劣的气候影响(IPCC, 2018)。为了实现这一目标,二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS)是必不可少的高新技术。现有的 CCUS 技术(包括驱油驱气注入封存和深部咸水层封存)大多数把 CO₂注入深部沉积岩地层内,对储存场地要求比较严格,比如上方必须有低渗透或不可渗透的地层作为盖层,以防止注入后可能发生的潜在泄露。其实,还可以把 CO₂注入地下反应性岩石(如玄武岩和橄榄岩)中,并促使其发生碳酸盐化反应,从而达到永久埋存的目的,这种方法几乎不会有泄露,是一种比较理想的长期解决方案(Snæbjörnsdóttir et al., 2020),对今后实现碳中和目标具有重要战略意义。最近,美国国家科学院、工程院和医学院(NASEM)发布报告,建议投资 10 亿美元,用 10~20 年时间,使矿物碳汇达到每年数兆吨(Mt) CO₂的规模(NASEM, 2019),以便为清除更多 CO₂作出更大贡献。玄武岩 CO₂地质封存作为工程矿物碳汇的一种,属于目前比较热门的前沿研究领域(Kelemen et al., 2019)。前人对玄武岩

CO₂地质封存理论已作了大量研究(Kelemen et al., 2019; Snæbjörnsdóttir et al., 2020; 张舟等, 2012),并取得丰硕成果,从而使得玄武岩 CO₂地质封存成为目前唯一的一种已经过现场试验和示范验证为有效的方式。目前世界上已有的玄武岩 CO₂地质封存工程仅冰岛 Carbfix、美国 Wallula 和日本 Nagaoka 三个项目。因此,总结玄武岩 CO₂封存理论方面的研究进展对于推动该领域进一步研究必然会有帮助。

1 玄武岩 CO₂地质封存理论

1.1 玄武岩固碳机理

1.1.1 岩石矿物学原理

早在 30 多年前就已提出利用矿物转化方式来封存 CO₂(Seifritz, 1990; Lackner et al., 1993)。含有大量钙、镁硅酸盐矿物的岩石可以跟 CO₂发生反应,形成稳定的碳酸盐矿物,并且中和溶液的酸性(Gunter and Perkins, 1993)。McGrail 等(2003)最早提出利用玄武岩封存 CO₂,随后还估算了全球溢流型玄武岩的 CO₂封存潜力(McGrail et al., 2006)。此后,人们对这种封存方式的实验室和现场试验研究迅速升温,并取得了大量成果。

注:本文为中国地质调查项目“地学文献信息更新与服务”(编号:DD20190413)的成果。

收稿日期:2021-07-05;改回日期:2022-01-02;网络首发:2022-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.095

作者简介:李万伦,男,1972年生,博士,研究员,主要从事地学情报研究;Email: 784561271@qq.com

(1)对常见主要造岩矿物的封存能力进行了排序。比如依据每立方米矿物可封存 CO_2 的质量来对比,最重要的造岩矿物依次为橄榄石、辉石族、普通辉石、蛇纹岩、闪石等 (Xu Tianfu et al., 2004)。不过,人们普遍认为,封存潜力最大的矿物主要是硅灰石、镁橄榄石、蛇纹石、钙长石和玄武质玻璃 (Oelkers et al., 2008)。

(2)对玄武岩的矿物成分与矿化潜力进行了研究。结晶质玄武岩含有约 60% 的斜长石及约 40% 的辉石和橄榄石,因而玄武岩一般以斜长石和辉石为主要成分,其次为橄榄石、角闪石及黑云母。这些矿物使玄武岩中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等阳离子的总的质量百分比占到约 25% (McGrail et al., 2006),从而为玄武岩 CO_2 固碳反应奠定了物质基础。

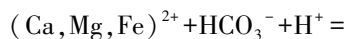
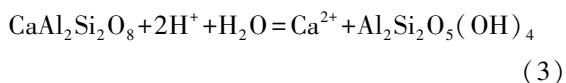
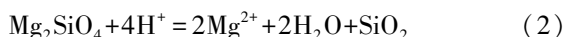
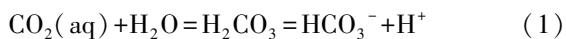
(3)对溢流型玄武岩层内的孔隙分布特征及其形成机理进行了研究。高温玄武岩熔岩流在固化成岩时由于冷却速率的变化、脱气、热收缩及与水反应等原因而形成的内部流动特征,这对 CO_2 封存很有意义。尤其玄武岩流动单元的顶底部为玻璃质和角砾化玄武岩,这也是其适合于 CO_2 封存的最主要特点;以每年数十万吨的速率往里面注入 CO_2 ,就可达到封存一般的中小型燃煤电厂所排放 CO_2 的需要。尽管玻璃质玄武岩层的厚度变化很大,但几乎只占玄武岩厚度的 15%~30% (McGrail et al., 2006)。而且在岩芯样品中发现,尽管玄武岩流顶部孔隙率变化较大,但可用孔隙有 70% 以上是互连互通的 (Saar and Manga, 1999; Song Shengrong et al., 2001);此外,溢流型玄武岩内部区域含水层的侧向连通性也很好。充足的孔隙度和侧向连通性能,为其接受大量注入的 CO_2 提供了可能 (McGrail et al., 2006)。

1.1.2 反应机理

(1)在自然界就存在玄武岩与大气 CO_2 结合的天然碳汇过程。因为大气中的 CO_2 可溶解于水,形成 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 阴离子;而当玄武岩风化释放出金属阳离子到水溶液中时,就会与碳阴离子发生反应,生成稳定的碳酸盐矿物,如 CaCO_3 (方解石)、 MgCO_3 (菱镁矿)、 $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ (丝钠铝石)、 FeCO_3 (菱铁矿)和 $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$ (铁白云石)等。除陆上玄武岩风化土壤固碳 (都凯等, 2012) 以外,洋底玄武岩通过水热蚀变也可发生碳酸盐化反应 (Kelley et al., 2001),深海钻探在玄武岩层中发现的方解石脉就是例证 (Goldberg et al., 2008)。

(2)通过大量研究,对玄武岩 CO_2 封存机理、反

应速率及影响因素等方面已取得了丰富认识 (Matter et al., 2009)。 CO_2 与岩石发生化学反应生成碳酸盐的过程实际上包括 CO_2 溶解于水溶液 (反应式 1)、岩石溶解于水溶液并分离出二价金属阳离子 (反应式 2 和 3) 以及碳酸根离子与二价阳离子反应生成沉淀物 (反应式 4 和 5)。上述过程可用化学式表示如下 (Matter et al., 2007; Matter et al., 2011):



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、流体流动速率和矿物接触表面积等 (Kelemen and Matter, 2008; Matter and Kelemen, 2009)。反应式 (4) 可以马上进行,但为了保证该反应向右发生,需要通过岩石溶解过程消耗掉 H^+ ,因此碳酸盐矿化的速率主要取决于岩石矿物的溶解速率 (反应式 2 和 3)。实验表明,矿物在反应过程中释放热量可以使碳酸盐化体系进入自我加热的良性循环,同时控制流体的流动速率可以保持最佳温度并使反应速率最大化。如李晓媛等 (2013) 通过溶解试验分析了 CO_2 矿化封存条件下玄武岩溶解反应速率并建立了模型,结果发现,通过搅拌可明显加快溶解反应速率 (约为 200%)。反应式 (1) 也很重要, CO_2 溶解于水除了受温度、压力和盐度影响以外,很大程度上取决于 pH 值 (当然,岩石矿物溶解也可能改变 pH 值)。

从总体上看, pH 值是最重要的反应参数,因为低 pH 值有利于硅酸盐矿物溶解,而高 pH 值则有利于碳酸盐矿物生成和沉淀 (Park and Fan, 2004; Pokrovsky and Schott, 2004)。实际上假如可以控制的话,更应当分两个步骤来完成上述过程 (Kelemen et al., 2019)。

此外,研究还发现,不同金属阳离子的反应机理也存在一定差异。比如当溶液超饱和时,已溶解的钙与 CO_2 在温度低于约 300 °C 时发生反应生成碳酸钙 (CaCO_3) 或文石并沉淀 (Ellis, 1959; Ellis, 1963); 当温度高于约 65 °C,已溶解的镁与 CO_2 反应生成碳酸镁 (MgCO_3) 或白云石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) 并沉淀 (Saldi et al., 2009; Johnson et al., 2014; Gadikota et al., 2014)。而当温度更低时,则可能抑制这些反应。

不过,已溶解的铁与 CO₂的反应机理更复杂,因为二价铁很可能在反应前就已经被氧化(Rogers et al., 2006)。

1.2 玄武岩 CO₂地质封存潜力

玄武岩 CO₂封存潜力巨大,它在地球上的分布面积相当广泛,包括大部分洋壳(占地球表面积的约 70%)和超过 5% 以上的陆地(图 1;Snbjörnsson et al., 2020)。尽管大陆玄武岩相对较少,但通过大陆硅酸盐风化吸收的 CO₂中仍有约 30%是被玄武岩风化作用所吸收的(Dessert et al., 2003)。

(1)洋底高原玄武岩。海底火山岩浆热液系统是自然界一个非常大的 CO₂吸收系统,其中的洋壳玄武岩吸收了该系统根部由于岩浆脱气所产生的巨量 CO₂(估计每年约 40 Mt (即 4000 万吨);Alt et al., 1999;Coogan et al., 2016)。据估算,华盛顿与不列颠哥伦比亚近海溢流型玄武岩的 CO₂封存量为 0.5~2.5 Tt (即 0.5~2.5 万亿吨),而加勒比海有 1~5.5 Tt(Goldberg et al., 2009)。

(2)洋中脊玄武岩。冰岛是位于海平面上方的洋中脊的一部分,据调查,那里的年轻又新鲜的玄武岩每 10 立方米可以天然地吸收超过一吨的 CO₂(Wiese et al., 2008);由此估计,全球洋中脊玄武岩的理论封存潜力在 100~250 Tt,数量级大于全球所

有化石燃料释放出的 CO₂(Snæbjörnsdóttir et al., 2014)。

(3)大陆溢流型玄武岩。以美国和印度(德干高原)最为典型,其中美国有四个地区的玄武岩具有 CO₂封存潜力,包括东部边缘的 Newark 超群、中西部北部地区的 Watchung 玄武岩、中大西洋基性岩省(CAMP)和哥伦比亚河玄武岩群(CRBG)(McGrail et al., 2006)。据估算,美国哥伦比亚河玄武岩群(CRBG)的封存量约为 36~148 Gt (即 360~1480 亿吨)(McGrail et al., 2006)。这些结果对封存场地选址具有重要指导意义。

国内也有学者对玄武岩封存潜力进行研究。一是对部分玄武岩油气藏的 CO₂埋存潜力进行了比较,结果发现,油气田的矿物固碳量远远高于常规油气藏封存量。例如松辽盆地东北部徐家围子断陷玄武岩油气藏的矿物固碳潜力约为 8.933 Gt,油气储层的封存能力约为 0.62 Gt(吾尔娜等,2012);而济阳拗陷玄武岩油气藏的矿物固碳潜力为 3.945 Gt,油气储层的封存能力约为 23 Mt(吾尔娜等,2017)。如果在常规的枯竭油气藏封存以外,再考虑玄武岩封存,可能有助于提高封存效率。二是对我国东南沿海进行了研究,结果发现,江苏、安徽东部、浙江、福建和广东诸省都广泛分布新生代玄武岩(周新民

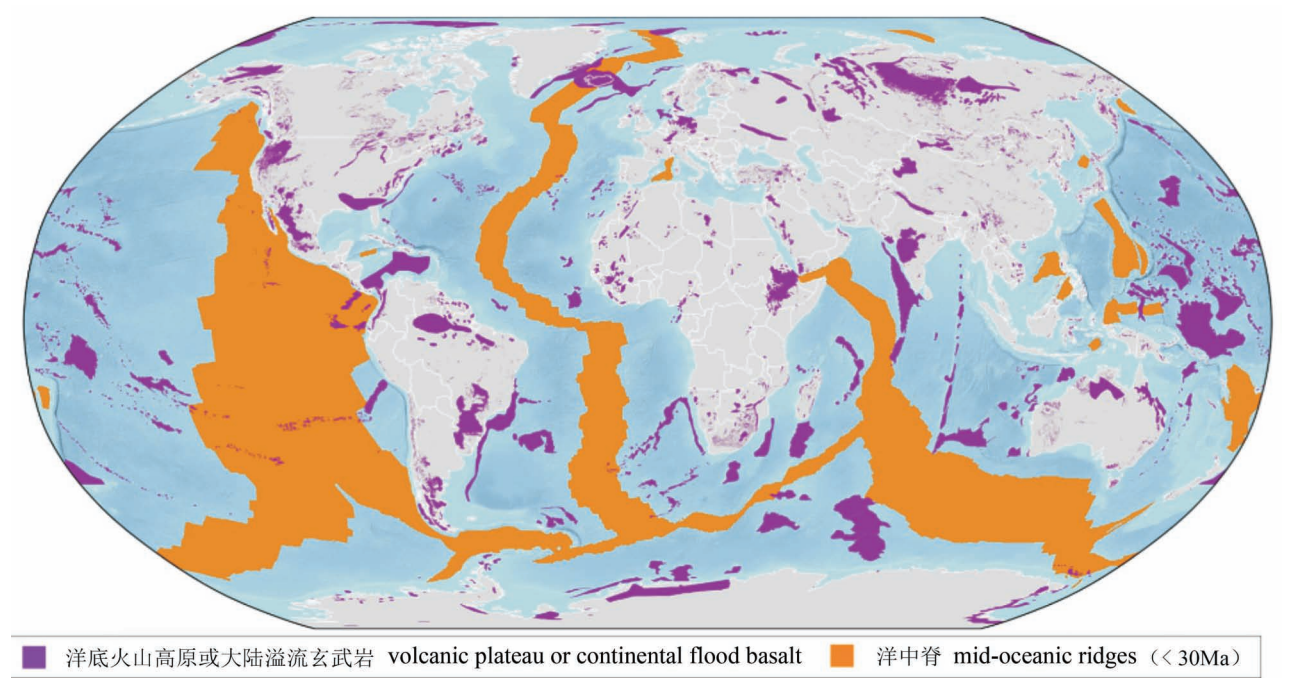


图 1 全球洋底火山高原、大陆溢流玄武岩和洋中脊(<30 Ma)分布图(据 Snbjörnsson et al., 2020)
Fig. 1 Global distribution of continental flood basalts, oceanic igneous plateau basalts and mid-ocean ridges (<30 Ma)
(After Snbjörnsson et al., 2020)

等,1981;赵海玲等,2004),具有较好的 CO_2 封存前景。东南沿海是我国经济发达地区, CO_2 排放量大,但却普遍缺少咸水层沉积盆地,不能采用常规咸水层封存;而且那里的超基性岩封存 CO_2 潜力也比较小(盛雪芬等,2011)。因此,我国东南沿海可作为今后玄武岩 CO_2 地质封存的重点研究地区。

1.3 封存场地与目标储层选择

根据对玄武岩分布与封存潜力的调查评估,已发现适合于 CO_2 封存的场地主要包括大陆溢流型玄武岩、洋底高原玄武岩和洋中脊玄武岩等三种类型。

1.3.1 大陆溢流型玄武岩

这类封存场地在美国和印度(尤其德干高原)最为常见。例如美国哥伦比亚河玄武岩群(CRBG)是一个世界级的溢流型玄武岩,不仅分布面积广,厚度也很大,是比较理想的 CO_2 封存场地。厚层溢流型玄武岩是由多期次的熔岩流组成的,由于快速冷却作用,每条熔岩流顶底部都富含玻璃质成分,孔隙发育,渗透率高,因而具有良好封存潜力。而中间结晶质玄武岩渗透率低,加上一些沉积岩夹层,都可充当盖层,起密封作用。

以 Wallula 项目为例,首先通过地震勘探对 Wallula 地区断裂体系进行了探测,同时也大致了解了地层结构情况。结果发现至少顺着地震测量线没有地表断裂和深部断裂存在,表明玄武岩层未受到大型断层破坏。2009 年在 Wallula 中试场地玄武岩中打了一口深 1253 m 的井,通过水文学分析确定了一个 59 m 厚的夹层(深 828~887 m 处)作为备选注入层。该注入层含有 3 个内部流动带(玄武岩角砾化带),其间被致密的非渗透性岩层分隔。所采用的井内识别工具是地球物理密度测量,它可以区分有孔隙的低密度玄武岩层和低渗透性的高密度玄武岩层(McGrail et al., 2017)。因此,封存场地要求断裂不太发育;目标储层最好玻璃质含量高或角砾化程度重,并且上覆非渗透性的能起密封作用的盖层。

1.3.2 洋中脊玄武岩

洋中脊一般位于海洋环境,但冰岛例外,它属于洋中脊的一部分,但却位于海平面上方,因此给 CO_2 封存试验和研究创造了得天独厚的条件。该地区:①属于比较年轻的火山活动区,具有较高的地热梯度,有利于流体流动,从而使反应更加迅速;②有大量水源可与 CO_2 一起注入;③玄武质玻璃含量较高,使碳矿化更迅速,因而是理想的 CO_2 封存场地(Kelemen et al, 2019)。不过该类地区通常发育断

裂构造,尤其地表破裂体系。如冰岛的 Hellisheiði 电厂位于亨吉尔(Hengill)火山系统的南部,该系统是由裂谷带扩张期的几个火山旋回形成的。亨吉尔中心火山位于一个长 60~100 km、宽 3~5 km 的北东—南西向火山成因破裂带的中部,那里发育地堑构造(图 2)。该地区大型正断层总落差超过 300 m (Franzson et al., 2005, 2010);这些断层对该地区岩层的渗透率有很大影响(Kristjánsson et al., 2016)。

Carbfix 为一期项目,注入井紧邻地热电厂(位于图 2 中左下角电厂旁边),便于获取气源。目标储层深度为 400~800 m,温度约 18~33 °C、孔隙度约 10%,为高渗透性裂缝玄武岩。储层位置的选择,除了考虑岩性和渗透率、地热梯度以外,还要注意地下水位。实际上,该注入场地的顶部 200~300 m 为相对未蚀变的橄榄石拉斑玄武岩熔岩流,其中有一个富氧地下水系统,静态地下水位约 100 m。在该熔岩流下面有一层 200 m 厚的轻微蚀变的玄武碎屑岩,将近地表水系统与更深的缺氧水系统分隔开。岩层地温梯度近似呈直线型,为 80 °C/km (Snæbjörnsdóttir et al., 2017)。

CarbFix2 为二期项目,注入井(HN-16)位于地堑构造西侧(图 2),其目标储层深度大大增加,由交替出现的玄武碎屑岩和熔岩组成。由于侵入岩在约 800 m 深度以下切割这些玄武碎屑岩/熔岩层,并在 1700 m 以下占据主导地位,因而对地下岩层的渗透性有很大贡献,由侵位形成的裂隙网络是 500 m 以下含水层渗透性的主要控制因素(如 Franzson, 1988)。2000 m 深岩层的温度范围为 220~260 °C。当然,含水层温度相对 CarbFix 项目明显升高,这对封存既有好处也有不利影响(Gunnarsson et al., 2018)。首先,高温能抑制微生物活动,减少对注入过程的影响;其次,高温能提高玄武岩溶解速率和碳酸盐矿物生成反应速率。不利方面是,方解石等碳酸盐矿物可能发生分解,并释放出 CO_2 。因此,有学者认为大约 185 °C 是最适宜地下矿物形成碳酸盐的温度(Gerdemann et al., 2002; Keleman and Matter, 2008)。据此,Carbfix2 将注入深度选择在地下 1200~1900 m(Gunnarsson et al., 2018)。

1.3.3 洋底高原玄武岩

由于洋底高原玄武岩分布广泛,海水资源几乎取之不竭,用之不尽,因而普遍认为未来海洋 CO_2 地质封存潜力更大。但目前海洋玄武岩 CO_2 封存研究项目还较少。Goldberg 等(2013)提出在南印度洋 Kerguelen 岛周围海底玄武岩中封存通过海洋风能

发电直接从空气中捕集的 CO₂。美国华盛顿与不列颠哥伦比亚附近海域的 Cascadia 盆地(位于 Juan de Fuca 板块上)也被认为是今后最有可能进行封存试验的地点,并在能源部 CarbonSAFE 项目支持下已开展了预可行性研究,结果认为,每年可以大那里封存大约 50 Mt CO₂,气源从附近海岸带就能获取,因而运输距离较短,是一个比较理想的封存地点 (Goldberg et al. ,2018)。

2 方法和应用

2.1 工程案例

截止目前,已知世界上有三个工程示范项目进行了玄武岩 CO₂地质封存试验 (EFI,2020)。包括:① 在日本长冈(Nagaoka)向火山沉积地层内注入了大约 10 kt (即 1 万吨)的超临界(液态)CO₂,注入后经流体取样分析,推断地下正在发生预想中的矿物—流体化学反应。② 美国华盛顿瓦鲁拉

(Wallula)先导性试验。从 2013 年 6 月至 7 月的三周时间内,一共注入了将近 1 kt CO₂,注入后两年,经取样分析,证实已成功实现了 CO₂的矿化封存。③ 冰岛 Carbfix 项目。2012 年先后两次分别把 175 t 纯 CO₂和 73 t 混合气体注入地下,结果在两年内有 95%以上矿化(Matter et al. ,2016)。从 2014 年开始升级,注入深度更大、温度更高的玄武岩层。随后的监测表明,所注入的大部分 CO₂在几个月的时间内就开始转化为碳酸盐矿物 (Snæbjörnsdóttir et al. , 2018)。

2.2 Carbfix 方法

上述项目中,其他项目都已停止试验,只有 Carbfix 项目进展比较大,且仍在继续。Carbfix 方法是冰岛 Hellisheiði 地热发电厂采用的玄武岩 CO₂地质封存方法。该方法采用分别注入 CO₂和水的创新方式,目的是控制二者的比例,确保 CO₂注入后完全溶解于水,从而减少渗露。而且由于 CO₂溶解于水

后,就不再有浮力,当注入 5 min 后就马上发生溶解捕获 (Sigfússon et al. , 2015),两年内 95%以上发生碳酸盐矿化固定 (Matter et al. , 2016),因而不可能再返回到地面,所以该方法不需要低渗透性盖层 (Snæbjörnsdóttir et al. , 2017)。使用该方法时,要求在注入多孔的玄武岩之前或注入期间,必须使 CO₂溶解于水 (Sigfússon et al. , 2015; Matter et al. , 2016)。因此,使用该方法需要大量用水 (Gunnarsson et al. ,2018)。

该方法在 Carbfix 项目第一阶段的成功,促使该项目升级为 Carbfix2 并继续开展下去。研究表明,冰岛 Hellisheiði 地热发电厂适用 CarbFix 方法的关键因素有三个:CO₂气源丰富、有可渗透的玄武岩和大量淡水 (Gunnarsson et al. , 2018)。冰岛有 90%以上的地区覆盖玄武岩,而且水资源丰富,因此该方法很容易推广到冰岛

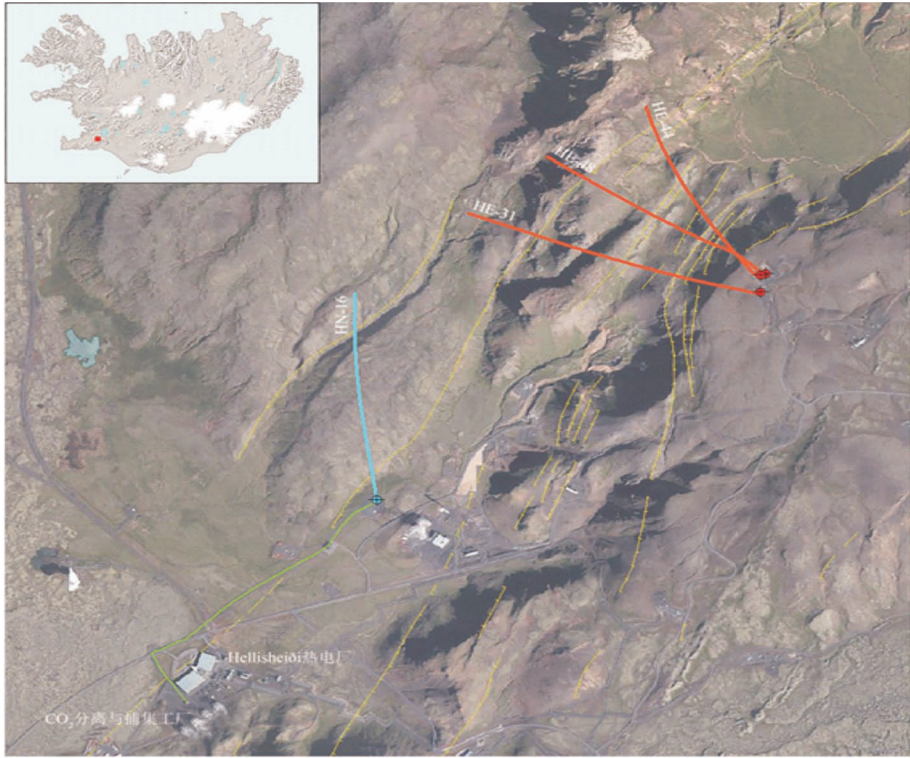


图 2 冰岛 CarbFix2 注入场地俯瞰图(据 Gunnarsson et al. ,2018)

Fig. 2 Overview of the CarbFix2 injection site, Iceland (After Gunnarsson et al. ,2018)
Hellisheiði 热电厂、气体分离与捕集工厂位于左下角。绿线为输气管道(连接气体分离与捕集工厂和注入井),蓝线与红线分别指示注入井和监测井位置。黄线代表主要断层及其相对运动方向
The Hellisheiði power plant and the gas separation plant are in the lower left of the figure. The gas charged water pipe (shown in green) connects the separation plant to the injection well. The blue and red lines point to the injection well and monitoring wells respectively. Major faults and their relative movements are shown in yellow

其他存在 CO₂ 排放点源的地方,比如铝冶炼厂(其 CO₂ 排放量占冰岛温度气体排放总量的约 30%),因此对冰岛实现预定气候目标具有重要意义(Sigfússon et al., 2018)。

据估算,Carbfix 项目 CCS(包括碳捕集、运输、注入和监测)的总体成本为 25~50 美元/吨(Gunnarsson et al., 2018; EFI, 2020)。而常规技术(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(Global CCS Institute, 2011; Rubin et al., 2015)。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。

3 存在问题

尽管玄武岩 CO₂ 地质封存研究已取得很大进展,但仍有一些问题需要进一步研究。

3.1 反应速率受多种因素影响,对最终封存效果起着决定性作用

长期以来,玄武岩 CO₂ 地质封存研究进展一直比较缓慢的重要原因,就是其反应时间长达数千年,如何加快反应速率对提升该技术的实践应用水平具有重要意义。尽管数值模拟表明,单独注入 CO₂,不到十年,玄武岩就可以将其碳酸盐化固定下来(Bacon et al., 2011);同时注入 CO₂ 和 H₂S 气体,CO₂ 在几十年内主要转变成方解石被埋存,而 H₂S 只需数年就转变成黄铁矿被埋存(Bacon et al., 2014);然而 Carbfix 项目仅在不到两年时间里完成了固碳过程。对此(碳酸盐化反应速率)的解释,现在还存在争议。Kelemen 等(2020)发现,Carbfix 项目估算出的反应速率与实验室测得的斜长石相当(后者是玄武岩中含量最高的矿物)。因此,Carbfix 项目碳酸盐化可能跟玄武岩的反应速率无关,而是跟注入速率有关。另外,他们又推测,玄武岩粒径小于 1 mm 或颗粒表面积较大,可能显著促进了反应速率加快。然而,根据 Oelkers 等(2008)的研究结果,玻璃质玄武岩反应速率比结晶质玄武岩快,因此,Carbfix 和 Wallula 目标储层中含量丰富的玻璃质玄武岩可能才是导致其反应速率异常迅速的根本原因。这可以作为今后选择封存场地和目标储层的重要依据。

3.2 堵塞或压裂和保护层会影响注入封存的稳定性或可持续性

注入 CO₂ 与玄武岩反应生成碳酸盐矿物,这种反应对于封存同时具有正反两方面的作用。不利的

是,在玄武岩孔隙内生成的反应物在结晶时可能会堵塞孔隙空间(Alfredsson et al., 2013),导致渗透率下降。有利的是,一方面碳酸盐和相关次生矿物沉淀通常比原生矿物体积更大,因而可堵塞沉淀处的通道或覆盖反应物表面(Godard et al., 2013);另一方面,沉淀反应时体积加大亦会导致破裂,或使裂缝张开,从而增加储层渗透率,使反应物接触流体表面积加大,从而有促进碳酸盐化的作用(Kelemen et al., 2012; Zhu Wenlu et al., 2016)。不管这两种机制以何种为主导,都对封存有重大影响。

当然,也有学者认为,由于溶解 CO₂ 的水溶液呈酸性,在注入过程中总体上倾向于使矿物溶解,并且使注入井附近的孔隙扩大,流体通道张开。所以,能充填孔隙的次生矿物仅仅在远离注入井的地方反应沉淀,而且玄武岩必须大量溶解并中和酸性的 CO₂ 注入流体(Snaebjörnsdóttir et al., 2018; Clark et al., 2018)。

此外,溶解于水的 CO₂ 或超临界 CO₂ 溶液与玄武岩溶解释放出的金属阳离子反应,还会生成固体反应物颗粒盖膜(即“保护层”),因此减少能反应的表面积,并抑制反应继续进行(Power et al., 2013)。由于玄武岩含有大量斜长石和辉石,当发生广泛碳酸盐化时,这个问题可能较严重,随着时间的推进,反应速率因为这种保护层会不断降低(Kelemen et al., 2019)。当然,了解能够促使反应进行下去的破裂驱动因素,可能比知道这种保护层的存在更重要。

3.3 封存潜力评价方法和结果不同

目前玄武岩 CO₂ 封存潜力评价仅是初步的,不同研究者采用不同方法可能得出不同结果。一般应先调查玄武岩储层特性,例如在冰岛通过岩芯样品的 3D X 射线显微 CT 图像分析来确定玄武岩的孔隙网络特性,并由水力压力试验来研究储层渗透率在压力作用下的变化,进而估算 Carbfix 项目所在场地的封存潜力约为 0.33 Gt(Callow et al., 2018)。在玄武岩油气藏中,主要依据岩石学和地球化学数据进行统计,由于并非全部岩石都会参加反应,因而按玄武岩与超临界流体相互作用的平均反应率的 40%(Bradshaw et al., 2007)来计算。

3.4 封存场地选址和储层选择缺乏统一标准与规范

一般在确定玄武岩封存场地时,首先应调查潜在场地的地质构造、玄武岩储层的矿物成分和结构及水文学特征,以评估是否可作为目标储层进行 CO₂ 注入和封存(NASEM, 2019)。玄武岩一般含有

大量蚀变矿物和玻璃质成分,这是它比原始的火成岩矿物更容易发生反应的重要原因(Alfredsson et al., 2013),因此,尤其有必要了解具体场地玄武岩中蚀变矿物和玻璃质成分的百分比及对碳矿化可能产生的影响,以便最终确定目标储层位置。另外,渗透安全也值得特别重视。任何场地进行 CO₂封存前都必需开展地震活动性评估。如德干高原火山岩省(DVP)从总的来看属于一块稳定的大陆内部块体,但仍然有地震活动现象存在(Reddy et al., 2000)。

目前玄武岩 CO₂地质封存场地尚无统一的选址标准和规范,也缺乏较齐全的评价指标体系。Wallula 项目注入的是超临界 CO₂流体,为了避免可能渗透,要求上方必须有低渗透盖层,同时应当避开断裂发育地区。此外,作为试验工程,该项目也没有考虑气源问题。

Carbfix 注入井位于冰岛 Hellisheiði 地热发电厂附近,所在位置地质条件良好、淡水资源丰富、地热发电厂所拥有的基础设施(可提供充足气源)等条件为采用 CarbFix 方法进行 CO₂封存创造了可能(Gunnarsson et al., 2018)。该项目还表明,非渗透性盖层并不是必需的,只要 CO₂在注入井内完全溶解就没有风险,其实这样更有利于玄武岩储层的选择,可筛选出更多和更大的储层进行 CO₂封存。

尽管海洋封存具有很大优势,除了封存量巨大外,CO₂渗透风险低是最大优点。因为当超临界 CO₂流体被注入海底封存后,由于深度超过 800 m,海水压力很大,因此基本不存在脱气风险,从而也降低了对监测措施的要求。从目前来看,海洋封存技术仍然难度很大,成本很高,而且 CO₂运输距离较长,因而对封存场地选择标准也较高,另外如何确定目标储层仍需进一步研究。

3.5 Carbfix 方法的使用受限

尽管 CarbFix 方法可以推广到冰岛其他地方,任何点源排放出的 CO₂都被注入玄武岩中并被矿化,以达到长期安全埋存的目的(Sigfússon et al., 2018)。但世界上许多缺少水资源的地区,显然不适合采用该方法进行 CO₂封存。另外,对用海水代替淡水的研究还在进一步进行中(Luhmann et al., 2017)。

4 结论和建议

(1)玄武岩 CO₂地质封存作为目前地球科学中比较前沿的新兴研究领域,对全球实现碳达峰碳中和气候目标具有潜在的战略意义。一是地球上玄武

岩分布广泛,封存容量巨大;二是该方法 CO₂渗漏的可能性很小,存储安全且具有永久性。

(2)玄武岩 CO₂固碳反应速率的影响因素可能主要包括玻璃质玄武岩含量与角砾化发育程度;目标储层应尽可能选择玻璃质含量高、角砾化严重的玄武岩层。

(3)适合进行 CO₂地质封存的玄武岩包括大陆溢流型玄武岩、洋底高原玄武岩和洋中脊玄武岩。

(4)尽管玄武岩 CO₂地质封存在理论研究和现场试验方面都已取得了一定进展,然而在实践过程中还存在较多问题,尤其需要开展更大规模的示范工程来进行验证。

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地质封存是一种可供选择的较为理想的长期解决方案。我国应紧跟国际前沿,从基础研究着手,通过实验室实验、场地试验和不同规模的工程示范,进一步提高理论和实践水平。具体地讲,可针对重点地区开展玄武岩 CO₂地质封存区域调查与区划,并提出场地选址建议,还可深入开展玄武岩储层特征研究。

致谢:中国地质调查局地学文献中心徐佳佳、谷阳、于洋、王欢等参加了碳中和相关项目工作,赵睿和房大任也收集了部分资料,陈旻副教授和章雨旭研究员审阅文稿,提出了很好的修改建议,在此一并致以衷心感谢!

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 都凯, 陈旻, 李峻峰, 李慧, 龙晓冰, 陈骏. 2012. 中国东部玄武岩风化土壤的粘土矿物及碳汇地球化学研究. 高校地质学报, 18(2): 256~272.
- 李晓媛, 常春, 于青春. 2013. CO₂矿化封存条件下玄武岩溶解反应速率模型. 现代地质, 27(6): 1477~1483.
- 盛雪芬, 李峻峰, 陈骏. 2011. 中国超基性岩封存 CO₂的潜力研究. 第四纪研究, 31(3): 447~454.
- 吾尔娜, 陈琦, 王伟伟, 宫华英. 2017. 济阳坳陷玄武岩油气藏储层的 CO₂封存潜力研究. 西部探矿工程, 12: 98~100.
- 吾尔娜, 吴昌志, 李峻峰, 王震宇, 顾连兴, 舒萍, 丁日新. 2012. 松辽盆地徐家围子断陷玄武岩气藏储层的 CO₂封存潜力研究. 高校地质学报, 18(2): 239~247.
- 张舟, 张宏福. 2012. 基性、超基性岩: 二氧化碳地质封存的新途径. 地球科学, 37(1): 156~162.
- 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 李剑, 邓晋福, 何恭算, 刘清华. 2004. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱. 地质学报, 78(6): 781~788.
- 周新民, 陈图华. 1981. 我国东南沿海新生代玄武岩的成分与演化特征. 地质学报, 55(1): 29~40.

- Alfredsson H A, Oelkers E H, Hardarsson B S, Franzson H, Gunnlaugsson E, Gislason S R. 2013. The geology and water chemistry of the Hellisheidi, SW-Iceland carbon storage site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12: 399~418.
- Alt J C, Teagle D A H. 1999. The uptake of carbon during alteration of ocean crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10): 1527~1535.
- Bacon D H, Murphy E M. 2011. Managing chemistry underground: is co-sequestration an option in selected formations? *Energy Procedia*, 4: 4457~4464.
- Bacon D H, Ramanathan R, Schaef H T, McGrail B P. 2014. Simulating geologic co-sequestration of carbon dioxide and hydrogen sulfide in a basalt formation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 21: 165~176.
- Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, Burruss R, Mathiassen O M. 2007. CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1: 62~68.
- Callow B, Falcon-Suarez I, Ahmed S, Matter J. 2018. Assessing the carbon sequestration potential of basalt using X-ray micro-CT and rock mechanics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 70: 146~156.
- Clark D E, Gunnarsson I, Aradóttir E S, Arnarson M, Órgeirsson A, Sigurðardóttir S S, Sigfússon B, Snæbjörnsdóttir S Ó, Oelkers E H, Gislason S R. 2018. The chemistry and potential reactivity of the CO₂—H₂S charged injected waters at the basaltic CarbFix2 site, Iceland. *Energy Procedia*, 146: 121~128.
- Coogan L A, Parrish R, Roberts N M W. 2016. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: insight from in-situ U-Pb dating. *Geology*, 44(2): 147~150.
- Dessert C, Dupre B, Gaillardet J, Godderis Y, François L, Shott J. 2003. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 202(3~4): 257~273.
- Du Kai, Chen Yang, Ji Junfeng, Li Hui, Long Xiaoyong, Chen Jun. 2012. Characteristics of clay minerals and CO₂ consumption rates of weathering profiles from Cenozoic basalts in eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 18(2): 256~272.
- Ellis A J. 1959. The solubility of calcite in carbon dioxide solutions. *American Journal of Science*, 257(5): 354~365.
- Ellis A J. 1963. The solubility of calcite in sodium chloride solutions at high temperatures. *American Journal of Science*, 261(3): 259~267.
- Energy Futures Initiative (EFI). 2020. Rock Solid: Harnessing Mineralization for Large-Scale Carbon Management. *Energy Futures Initiative (USA)*: 1~47.
- Franzson H, Gunnlaugsson E, Árnason K, Sæmundsson K, Steingrímsson B, Harðarson B S. 2010. Hengill geothermal system, conceptual model and thermal evolution. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia.
- Franzson H, Kristjánsson B R, Gunnarsson G, Björnsson G, Gislason G. 2005. The Hengill—Hellisheidi geothermal field, development of a conceptual geothermal model. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey.
- Franzson H. 1988. Nesjavellir: Permeability in Geothermal Reservoir (in Icelandic). OS-88046/JHD-09. Energy Authorities of Iceland, Reykjavik.
- Gadikota G, Matter J, Kelemen P, Park A H A. 2014. Chemical and morphological changes during olivine carbonation for CO₂ storage in the presence of NaCl and NaHCO₃. *Physical Chemistry Chemical Physics Pccp*, 16(10): 4679~4693.
- Gerdemann S J, Dahlin D C, O'Connor W K. 2002. Carbon dioxide sequestration by aqueous mineral carbonation of magnesium silicate minerals. *Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*: 2003~018.
- Global CCS Institute. 2011. Economic Assessment of Carbon Capture and Storage Technologies: 2011 Update. Canberra ACT 2601 Australia.
- Godard M, Luquot L, Andreani M, Gouze P. 2013. Incipient hydration of mantle lithosphere at ridges: a reactive—percolation experiment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 371~372: 92~102.
- Goldberg D S, Lackner K S, Han P. 2013. Co-location of air capture, sub-seafloor CO₂ sequestration, and energy production on the Kerguelen plateau. *Environmental Science & Technology*, 47: 7521~7529.
- Goldberg D S, Takahashi T, Slagle A L. 2008. Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105(29): 9920~9925.
- Goldberg D, Aston L, Bonneville A, Demirkanli I, Evans C, Fisher A, Garcia H, Gerrard M, Heesemann M, Hnottavange-Telleen K. 2018. Geological storage of CO₂ in sub-seafloor basalt: the CarbonSAFE pre-feasibility study offshore Washington State and British Columbia. *Energy Procedia*, 146: 158~165.
- Goldberg D, Slagle A L. 2009. A global assessment of deep-sea basalt sites for carbon sequestration. *Energy Procedia*, 1: 3675~3682.
- Gunnarsson I, Aradóttir E S, Oelkers E H, Clark D E, Arnarson M, Sigfússon B, Snæbjörnsdóttir S Ó, Matter J M, Stute M, Júlíusson B M. 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.
- Gunter W D, Perkins E H. 1993. Aquifer disposal of CO₂-rich gases: Reaction design for added capacity. *Energy Conversion & Management*, 34(9~11): 941~948.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2018. Summary for Policymakers. in: *Global warming of 1.5 °C*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland: 1~32.
- Johnson N C, Thomas B, Maher K, Rosenbauer R J. 2014. Olivine dissolution and carbonation under conditions relevant for in situ carbon storage. *Chemical Geology*, 373(1): 93~105.
- Kelemen P B, Hirth G. 2012. Reaction-driven cracking during retrograde metamorphism: Olivine hydration and carbonation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 345: 81~89.
- Kelemen P B, Matter J M. 2008. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105(45): 17295~17300.
- Kelemen P B, Matter J. 2008. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 11(45): 17295~17300.
- Kelemen P B, McQueen N, Wilcox J, Renforth P, Dipple G, Vankeuren A P. 2020. Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology*, 550, 119628.
- Kelley D S, Karson J A, Blackman D K, Früh-Green G L, Butterfield D A, Lilley M D, Olson E J, Schrenk M O, Roe K K, Lebon G T. 2001. An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic ridge at 30°N. *Nature*, 412(6843): 145~149.
- Kristjánsson B R, Axelsson G, Gunnarsson G, Gunnarsson I, Óskarsson F. 2016. Comprehensive tracer testing in Hellisheidi Geothermal field in SW-Iceland. *Proc. 41st Workshop on Geothermal Engineering*. Stanford, California, USA, 22~24 February 2016: 399~418.
- Lackner K S, Wendt C H, Butt D P, Joyce E L, Sharp D H. 1995.

- Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20(11): 1153~1170.
- Li Xiaoyuan, Chang Chun, Yu Qingchun. 2013&. Model of basalt dissolution rate under CO₂ mineral sequestration conditions. *Geoscience*, 27(6): 1477~1483.
- Luhmann A J, Tutolo B M, Tan Chunyang, Moskowitz B M, Saar M O, Seyfried Jr. W E. 2017. Whole rock basalt alteration from CO₂-rich brine during flow-through experiments at 150 °C and 150 bar. *Chemical Geology*, 453: 92~110.
- Matter J M, Broecker W S, Gislason S R, Gunnlaugsson E, Sigfússon B. 2011. The CarbFix Pilot Project—storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia*, 4: 5579~5585.
- Matter J M, Kelemen P B. 2009. Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. *Nature Geosciences*, 2(12): 837~841.
- Matter J M, Stute M, Snæbjörnsdóttir S Ó, Oelkers E H, Gislason S R, Aradóttir E S, Sigfússon B, Gunnarsson I, Sigurdardóttir H, Gunnlaugsson E, Axelsson G, Alfredsson H A, Wolff-Boenisch D, Mesfin K, de la Reguera Taya F D, Hall J, Dideriksen K, Broecker W S. 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291): 1312~1314.
- Matter J M, Takahashi T, Goldberg D. 2007. Experimental evaluation of in situ CO₂—water—rock reactions during CO₂ injection in basaltic rocks: Implications for geological CO₂ sequestration, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(2): Q02001.
- McGrail B P, Ho A M, Reidel S P, Schaeff H T. 2003. Use and features of basalt formations for geologic sequestration, in: Gale J. and Kaya Y. eds. *Proceedings of the Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. Elsevier, vol. II: 1637~1640.
- McGrail B P, Schaeff H T, Ho A M, Chien Y J, Dooley J J, Davidson C L. 2006. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *J. Geophys. Res.*, 111(B12): B12201.
- McGrail B P, Schaeff H T, Spane F A, Cliff J B, Qafoku O, Horner J A. 2017. Field validation of supercritical CO₂ reactivity with basalts. *Environmental Science & Technology Letters*, 4: 6~10.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine (NASEM), 2019. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington DC: The National Academies Press: 1~495.
- Oelkers E H, Cole D R. 2008. Carbon dioxide sequestration: a solution to a global problem. *Elements*, 4(5): 305~310.
- Park A H A, Fan L S. 2004. CO₂ mineral sequestration; Physically activated dissolution of serpentine and pH swing process. *Chemical Engineering Science*, 59(22~23): 5241~5247.
- Pokrovsky O S, Schott J. 2004. Experimental study of brucite dissolution and precipitation in aqueous solutions: Surface speciation and chemical affinity control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 31~45.
- Power I M, Harrison A L, Dipple G M, Wilson S A, Kelemen P B, Hitch M, Southam G. 2013. Carbon mineralization: From natural analogues to engineered systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77(1): 205~260.
- Reddy C D, El-Fiky G, Kato T, Shimada S, Shimada S, Kumar K V. 2000. Crustal strain field in the Deccan trap region, western India, derived from GPS measurements. *Earth, Planets and Space*, 52: 965~969.
- Rogers K L, Neuhoﬀ P S, Pedersen A K, Bird D K. 2006. CO₂ metasomatism in a basalt-hosted petroleum reservoir, Nuussuaq, West Greenland. *Lithos*, 92(1~2): 55~82.
- Rubin E S, Davidson J E, Herzog H J. 2015. The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40: 378~400.
- Saar M O, Manga M. 1999. Permeability—porosity relationship in vesicular basalts. *Geophys. Res. Lett.*, 26(1): 111~114.
- Saldi G D, Jordan G, Schott J, Oelkers E H. 2009. Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5646~5657.
- Seifritz W. 1990. CO₂ disposal by means of silicates. *Nature*, 345(6275): 486~490.
- Sheng Xuefen, Ji Junfeng, Chen Jun. 2011&. Assessment of carbon dioxide sequestration potential of ultramafic rocks in China. *Quaternary Sciences*, 31(3): 447~454.
- Sigfússon B, Arnarson M, Snæbjörnsdóttir S Ó, Karlsdóttir M R, Aradóttir E S, Gunnarsson I. 2018. Reducing emissions of carbon dioxide and hydrogen sulphide at Hellisheidi power plant in 2014~2017 and the role of CarbFix in achieving the 2040 Iceland climate goals. *Energy Procedia*, 146: 135~145.
- Sigfússon B, Gislason S R, Matter J M, Stute M, Gunnlaugsson E, Gunnarsson I, Aradóttir E S, Sigurdardóttir H, Mesfin K, Alfredsson H A, Wolff-Boenisch D, Arnarson M T, Oelkers E H. 2015. Solving the carbon-dioxide buoyancy challenge: the design and field testing of a dissolved CO₂ injection system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37: 213~219.
- Snæbjörnsdóttir S Ó, Gislason S R, Galeczka I M, Oelkers E H. 2018. Reaction path modelling of in-situ mineralisation of CO₂ at the CarbFix site at Hellisheidi, SW-Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 348~366.
- Snæbjörnsdóttir S Ó, Oelkers E H, Mesfin K, Aradóttir E S, Dideriksen K, Gunnarsson I, Gunnlaugsson E, Matter J M. 2017. The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralization of CO₂ and H₂ S at the CarbFix site in SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 58: 87~102.
- Snæbjörnsdóttir S Ó, Sigfússon B, Marieni C, Goldberg D, Gislason S R, Oelkers E H. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews | Earth & Environment*, 1: 90~102.
- Snæbjörnsdóttir S Ó, Wiese F, Fridriksson T, Ármannsson H, Einarsson G M, Gislason S R. 2014. CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63: 4585~4600.
- Song Shengrong, Jones K W, Lindquist B W, Dowd B A, Sahagian D L. 2001. Synchrotron X-ray computed microtomography: Studies on vesiculated basaltic rocks, *Bulletin of Volcanology*, 63(4): 252~263.
- Uerna Amy, Chen Qi, Wang Shiwei, Gong Huaying. 2017#. Study on CO₂ sequestration potential of basalt reservoir in Jiyang Depression. *Western Exploration Engineering*, 12: 98~100.
- Uerna Amy, Wu Changzhi, Ji Junfeng, Wang Zhenyu, Gu Lianxing, Shu Ping and Ding Rixin. 2012&. Potential capacity and feasibility of CO₂ sequestration in petroleum reservoirs of basaltic rocks: example from basaltic hydrocarbon reservoir in the Xujiaweizi Fault Depression the Songliao Basin, East China. *Geological Journal of China Universities*, 18(2): 239~247.
- United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC). 2016. Report of the conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015.
- Wiese F, Fridriksson T, Ármannsson H. 2008. CO₂ Fixation by calcite in high-temperature geothermal systems in Iceland. *Iceland Geosurvey: ÍSOR-2008/003*: 1~70.
- Xu Tianfu, Apps J A, Pruess K. 2004. Numerical simulation of CO₂

- disposal by mineral trapping in deep aquifers. *Applied Geochemistry*, 19(6): 917~936.
- Zhang Zhou, Zhang Hongfu. 2012&. Carbonation of Mafic—Ultramafic Rocks: A New Approach to Carbon Dioxide Geological Sequestration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 156~162.
- Zhao Hailing, Di Yongjun, Liu Zhenwen, jian li, Deng Jinfu, He Gongsuan, Liu Qinghua. 2004&. Cenozoic volcanism and mantle plume along southeast coast of China. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 781~788.
- Zhou Xinmin, Chen Tuhua. 1981&. Composition and evolution of Cenozoic basaltic rocks in southeastern coastal provinces of China, *Acta Geologica Sinica*, 55(1): 29~40.
- Zhu Wenlu, Fusseis F, Lisabeth H, Xing Tiange, Xiao Xianghui, De Andrade V, Karato S. 2016. Experimental evidence of reaction-induced fracturing during olivine carbonation. *Geophys. Res. Lett.* 43(18): 9535~9543.

Research Progress of CO₂ Geological Sequestration in Basalts

LI Wanlun, CHEN Jing, JIA Lingxiao, MA Bing, CHEN Yang, SUN Junyi

Geological Literature Center of China Geological Survey, Beijing, 100083

Abstract: Compared with conventional storage technologies (CO₂ Enhanced Oil Recovery or CO₂-EOR, deep saline reservoir, etc.), the geological storage of CO₂ in basalts has obvious advantages such as rapid CO₂ mineralization, permanent and safe storage and with huge storage capacity. At present, a great deal of progress has been made about theoretical research on CO₂ sequestration in basalts: ① sorting the sequestration capacity of common main rock-forming minerals; ② making a full understanding about the mineral composition of basalts, pore distribution characteristics in basaltic rock layer as well as its formation mechanism; ③ improving the understanding of CO₂ sequestration mechanism in basalts, reaction rates and the related influencing factors; ④ finding out the distribution of ideal basalts available for storage on the Earth and evaluating the sequestration potential of various typical basalts; and ⑤ It is found that the sites suitable for CO₂ sequestration mainly include three types: continental flood basalts, oceanic igneous plateau basalts and mid-ocean ridge basalts, and preliminary evaluation criteria for target reservoir selection are also put forward. After summarizing the CO₂ sequestration mechanism of basalts, the potential of CO₂ geological storage of basalts and the selection methods of storage sites and target reservoirs, this paper introduces three existing engineering demonstration projects of CO₂ geological storage of basalts in the world: Carbfix in Iceland, Wallula in the United States and Nagaoka in Japan, and discusses existing problems about CO₂ geological storage of basalts: ① the reaction rate is affected by many factors, which plays a decisive role in the final sealing effect; ② plugging or fracturing and protective layer formed during injecting will affect the stability or sustainability of injection and storage; ③ different people used varied methods to evaluate sealing potential and obtained different results; ④ the selection of both sealing sites and reservoir still lack common standards and specifications; and ⑤ the use of Carbfix method beyond Iceland is limited to some extent.

Keywords: basalts; carbon dioxide; sequestration mechanism; reaction rate; sequestration site; target reservoir; sequestration method

Acknowledgements: This work was supported by the Chinese Geological Survey Project “Update and Service of Geoscience Literature Information” (No: DD20190413). XU Jiajia, GU Yang, YU Yang, WANG Huan of Geological Literature Center of China Geological Survey participated in the project which is related to carbon neutrality, ZHAO Rui and FANG Daren collected a few literature, and the reviewers, associate professor CHEN Yang of Nanjing University and professor ZHANG Yuxu, put forward good suggestions for revising the paper. We would like to express our heartfelt thanks to all of them!

First author: LI Wanlun, male, born in 1972, a research fellow, mainly engaged in the study of geological information; Email: 784561271@qq.com

Manuscript received on: 2021-07-05; Accepted on: 2022-01-02; Network published on: 2022-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.095

Edited by: ZHANG Yuxu

