马馨蕊,梁杰,李清,等. 多类型岩石二氧化碳矿化封存机制研究——以玄武岩与砂岩为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(3): 56-64. MA Xinrui, LIANG Jie, LI Qing, et al. Study of CO<sub>2</sub> mineralization and storage mechanism in basalt and sandstone[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(3): 56-64.

# 多类型岩石二氧化碳矿化封存机制研究 ——以玄武岩与砂岩为例

马馨蕊<sup>1,2,3,4,5,6</sup>,梁杰<sup>2,3,4,5,6\*</sup>,李清<sup>2,3,4,5,6\*</sup>,陈建文<sup>2,3,4,5,6</sup>,袁勇<sup>2,3,4,5,6</sup>,骆迪<sup>2,3,4,5,6</sup>,赵化淋<sup>2,3,4,5,6</sup> (1中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100; 2中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266237; 3青岛海洋科技中心海洋 矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266237; 4青岛市海洋地质碳封存重点实验室,青岛 266237; 5青岛市海洋地质碳封存 工程研究中心,青岛 266237; 6海洋地质碳封存山东省工程研究中心,青岛 266237)

摘 要:CO<sub>2</sub>的人为排放严重威胁人类的生存环境,导致生态系统发生重大变化。近年来提出的地质封存是处理大气中多余 CO<sub>2</sub>的技术之一,根据机制可分为物理封存和化学封存,前 者依赖储层岩石孔隙的物理特性,后者则通过 CO<sub>2</sub>与地层岩石的反应实现。化学方法中的矿 化封存是利用 CO<sub>2</sub>转化为稳定固体碳酸盐,达到长期储存的目标,被视为最安全稳定的封 存技术。通过探讨 CO<sub>2</sub> 矿化封存的机理及其潜力,对比分析了不同岩石中的反应机制、影响 因素和矿化速率、储存能力,总结了玄武岩和砂岩中 CO<sub>2</sub> 矿化封存的优缺点,结合目前全球已 经成功实施的 2 例玄武岩矿化封存示范工程,提出碎屑岩储层中 CO<sub>2</sub> 矿化封存思路和 展望。

**关键词:**CCUS; CO<sub>2</sub> 地质封存; CO<sub>2</sub>-水-岩反应; CO<sub>2</sub> 矿化机制 中图分类号:P744.4; P618.13 文献标识码:A **DOI**:10.16028/j.1009-2722.2024.256

0 引言

碳捕集、利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)是 CO<sub>2</sub> 减排技术发展的

#### 收稿日期: 2024-11-08

资助项目:国家自然科学基金"南黄海崂山隆起二叠系储层油气成藏破 坏与流体演化过程还原研究"(42076220),"南黄海 CSDP-2 井二叠系砂 岩储层致密化过程及其对油气充注事件的响应"(42206234);中国地质调 查局项目"我国东部海域地质碳封存选区调查评价"(DD202503023), "渤海等海域新生界油气地质条件与碳封存选区"(DD20230401); 山东省自然科学基金"南黄海盆地崂山隆起石炭系油气保存条件的主控 因素分析"(ZR2020MD071),"南黄海盆地崂山隆起上二叠统特低渗砂岩 致密层储层表征研究"(ZR2020QD038);自然资源科技战略研究项目"海 底地质碳封存战略研究"(2023-ZL-18)

**第一作者:** 马馨蕊(2000一), 女, 在读硕士, 主要从事 CO<sub>2</sub> 地质封存与利 用方面的研究工作. E-mail: katherine00k@foxmail.com

\*通讯作者:梁杰(1979—),男,博士,正高级工程师,主要从事海域油气 资源调查方面的研究工作. E-mail: cgsljie@mail.cgs.gov.cn

李清(1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事天然气水合物与碳封存 方面的研究工作. E-mail: qing.li@live.cn 新趋势,通过捕获燃煤发电厂等排放的 CO<sub>2</sub>,将其 再利用、储存,使其不进入大气,实现在应对气候变 化的同时带来经济效益。CCUS包括CO2的捕获、 运输、储存和使用<sup>[1]</sup>。其中, CO<sub>2</sub>地质封存(Carbon Geological Storage, CGS)作为关键步骤对降低 CO2 浓度发挥重要作用,现阶段封存场所为油气田、深 部咸水层和不可开采的煤层,在这些介质中,CO, 又通过构造、剩余气、溶解和矿化封存4种机制单 一或协同被安全稳定地储存<sup>[2]</sup>。据 2021 年统计, 在 27 个商业规模的 CGS(Caron Capture and Storage)设施中,有22个废弃油气田和5个深部咸水 层储存项目<sup>[3]</sup>,占总数的 80% 以上。可见 CO,封 存的目标体以构造圈闭为主导,近期的研究和试点 项目也证明了矿化封存的可行性<sup>[4-5]</sup>。与其他方式 相比, 矿化封存的显著优势在于: 矿化反应是最安 全、稳定的机制<sup>[6-7]</sup>,具有高度可验证和永久性;矿 化过程能贡献巨大的 CO2 封存量, 尽管所需时间长, 但能够在万年尺度内贡献高达 40% 的净 CO2 封存 能力<sup>[8]</sup>,据估计,全球大陆溢流玄武岩、洋底高原、 洋中脊玄武岩的理论碳储量超过 1.05 亿 t<sup>[9]</sup>,比化 石燃料燃烧产生的总排放量高几个数量级<sup>[10]</sup>;矿化 封存的原料众多,涵盖工业废固、碱性液体、岩石及 尾矿等<sup>[11]</sup>;矿化反应无需能量输入,能大大降低注 入和监测成本,且反应产物主要是 SiO<sub>2</sub> 和碳酸盐, 在长尺度地质时期内是稳定的。综合来看,矿化封 存是一种前景广阔且具有实际应用潜力的 CO<sub>2</sub> 封 存手段。

### 1 CO2 矿化封存机理

SEIFRITZ<sup>[12]</sup>于 1989年首次提出"CO<sub>2</sub> 矿化"的概念,并发现该过程是自发放热的化学反应,具有一定规模,可以消耗大气中的 CO<sub>2</sub>。1995年,LACKNER<sup>[13]</sup>进一步发现含有 MgO、CaO 等的矿物能与 CO<sub>2</sub>反应,完成化学固定;而后众多学者开展了实验,并得出含镁、铁、钙的天然矿物更易于在酸性环境中浸析出金属离子,并生成碳酸盐的结论<sup>[14-15]</sup>。CO<sub>2</sub> 矿化无时无刻不在发生,BEAULIE 等<sup>[16]</sup>计算得出,该过程每年可从大气中永久移除约 0.3 亿 t 的 CO<sub>2</sub>。

#### 1.1 被动矿化和主动矿化

一般来说,自然界中的硅酸盐、工业尾矿库等 一旦暴露在空气中,无需能量就能发生缓慢的矿化 反应,该过程称为被动矿化过程。有学者在阿曼苏 丹国发现了一处橄榄岩,自然矿化速度惊人,每年 约有 1~10 万 t 的 CO<sub>2</sub> 在该地通过风化变为固体碳 酸盐<sup>[17-18]</sup>。 主动矿化根据位置可分为原位矿化和非原位 矿化,前者是指通过注入 CO<sub>2</sub> 气体或富 CO<sub>2</sub> 混合 物/地下水流体,促进其反应生成稳定矿物<sup>[19]</sup>,反应 物包含硅酸盐、氧化铁、氧化铝等;非原位矿化是指 利用天然矿物和工业碱性废料,通过直接和间接反 应实现矿化,这也是目前常用于处理采矿、灰分等 的方式之一<sup>[20-1]</sup>,已在南非的金伯利岩矿、Mount Keith 矿和西澳大利亚的露天镍矿中广泛应用<sup>[22-23]</sup>。

### 1.2 矿化反应过程

尽管 CO<sub>2</sub> 矿化途径和岩石类型不同,但大致机 理是相似的,过程可分为 3 个阶段<sup>[24]</sup>(图 1)。

以橄榄石为例,3个阶段反应的化学方程式如式(1--7):

$CO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(aq)$ (1)
---

$CO_2(aq)+H_2O(l) \rightleftharpoons H_2CO_3(aq)$	(2)
---	-----

- $H_2CO_3(aq) \leftrightharpoons H^+(aq) + HCO_3^-(aq)$  (3)
- $HCO_{3}^{-}(aq) \rightleftharpoons H^{+}(aq) + CO_{3}^{2-}(aq)$  (4)

 $H_2O(l) \leftrightharpoons H^+(aq) + OH^-(aq) \tag{5}$ 

 $Mg_2SiO_4+4H^+ \rightarrow 2Mg^{2+}+2H_2O+SiO_2(aq)$  (6)

$$\operatorname{CO}_3^{2-}(\operatorname{aq}) + \operatorname{Mg}^{2+} \rightleftharpoons \operatorname{MgCO}_3(\operatorname{s})$$
 (7)

CO<sub>2</sub>-水-岩关系是复杂耦合作用下的平衡体系, 溶液中存在酸碱平衡、溶解平衡、离子交换平衡和 化学反应平衡。根据 Le Chatelier 原理<sup>[25]</sup>,改变可 逆反应的条件时,化学平衡被破坏,并向减弱这种 改变的方向移动,因此,CO<sub>2</sub>溶于水后形成大量碳 酸,反应(3)、(4)持续进行,溶液中 H<sup>+</sup>浓度显著增



加,平衡体系的 pH 降低,并促进反应(6)。橄榄石 在酸性溶液中的溶解速率更快,且由矿物表面形成 的化合物控制,在 pH 较小时,倾向于以 Mg<sup>2+</sup>与 H<sup>+</sup> 发生离子交换,并在该过程中形成 SiO<sub>2</sub><sup>[26]</sup>,阻止 H<sup>+</sup> 从水溶液中扩散到未反应橄榄石的表面,从而限制 后续的浸出速率,随着反应不断进行,H<sup>+</sup>被消耗,稳 定的碳酸盐在高 pH 环境下形成。

### 1.3 适合 CO2 矿化的岩石类型

自然界中有几类岩石化学风化迅速,含有能形 成稳定碳酸盐的元素,非常适合 CO<sub>2</sub> 矿化<sup>[27]</sup>。如 镁铁质和超镁铁质岩石,由硅酸盐矿物组成,反应 效率高,孔渗条件好,具有相当大的封存潜力,明确 这类岩石的封存机理对后续工程的实施起关键作 用。但只有火成岩矿化远远不够,有数据显示,中 国中东部地区新生代玄武岩总面积为 78525 km<sup>2[28]</sup>, 约占国土总面积的 8%,而全国及毗邻海域沉积盆 地面积>200 km<sup>2</sup>的盆地有 417 个,面积约 574.8× 10<sup>4</sup> km<sup>2[29]</sup>,是玄武岩面积的几十倍,特别是近海陆 架盆地分布广泛,与 CO<sub>2</sub> 排放源有良好的匹配性, 其中,碎屑岩储层也含有矿化反应的潜在矿物。因 此,了解这类岩石的矿化机理,对丰富 CO<sub>2</sub> 地质封 存过程具有重要意义。

### 2 玄武岩中的 CO<sub>2</sub> 矿化封存

玄武岩是镁铁质最丰富的火成岩,特别在海 洋<sup>[30]</sup>。WOLFF等<sup>[31]</sup>提出,CO<sub>2</sub>-水-玄武岩反应释放 的 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>比富含 SiO<sub>2</sub>的岩石大 2 个数量级,高 含量的 CaO(6wt%~12wt%)和 MgO(4wt%~10wt%) 使其矿化速率高、更具反应性<sup>[32]</sup>。玄武岩流凝固过 程中冷却脱气和热收缩作用为形成孔隙提供了基 础条件,有利于 CO<sub>2</sub>的吸附和封存。因此,玄武岩 被众多学者认为是 CO<sub>2</sub>注入和快速碳矿化的最合 适选择<sup>[11,33]</sup>。

### 2.1 玄武岩矿化封存机理

玄武岩封存 CO<sub>2</sub> 依靠溶解和沉淀 2 个过程, 且 在充满液体的裂缝和孔隙中进行, 实际速率大于等 于实验室测量的速率<sup>[3435]</sup>。一般来说, 工业注入的 CO<sub>2</sub> 处于超临界态, 显示出高密度、低黏度和低压 缩性<sup>[36]</sup>, 溶解能力显著增强。注入后, CO<sub>2</sub> 与水反 应形成碳酸, 接着硅酸盐矿物与溶液中的 H<sup>+</sup>发生离 子交换,优先沿暴露的岩石表面释放,随着反应向前推进,酸性增强,进一步加速溶解。XIONG等<sup>[37]</sup>发现,橄榄石、辉石、斜长石和玻璃是常见的二价阳离子源,当矿物中的离子被浸出到微裂缝和孔隙中时,缓慢的扩散作用会帮助离子不断积累并达到形成碳酸盐的过饱和度后析出。研究表明,加快硅酸盐矿物溶解速率有效增强了的二价金属阳离子的沉淀速率<sup>[38]</sup>,生成的碳酸盐不仅能有效封存 CO<sub>2</sub>,还极有可能对地质结构的长期稳定性产生积极影响。

### 2.2 玄武岩矿化封存试点项目

目前全球已经开展了2项大型玄武岩矿化封 存试点项目,包括冰岛的 CarbFix 和美国的 Wallula 项目。 CarbFix 试点项目旨在促进和验证玄武 岩中的原地矿化,通过将CO,和水混合后注入天然 玄武岩层中,实现永久处置人为排放的 CO2<sup>53</sup>。研 究人员利用地震、地球化学监测和示踪剂分析等方 式对注入的气体进行全面分析,结果表明,高达 95%的 CO2在不到2年的时间里矿化,反应产物主 要是方解石和黄铁矿<sup>[39]</sup>,证实短周期内也可实现 CO,的矿化封存。美国 Wallula 项目的封存量更大, 开始4年后约有1000t的CO2被注入哥伦比亚河 玄武岩带,为了实现注入条件模拟,设计了世界第 1 口超临界 CO<sub>2</sub> 注入井<sup>[40]</sup>。WHITE 等<sup>[41]</sup> 的建模 结果表明,注入的 CO2约 60% 在两年内通过矿化 被封存,产生的碳酸盐占据了可用储层孔隙空间的 4%。这2个大型试点项目的实施,有效解决了研究 人员长期以来对矿化封存时间尺度的担忧。

### 3 砂岩中的矿化封存

尽管玄武岩地层能作为良好的 CO<sub>2</sub> 矿化封存 地点,但大多数碳封存项目都将 CO<sub>2</sub> 注入了分布更 广泛的碎屑岩沉积盆地。近期研究表明,深部咸水 层、废弃的油气田是 CO<sub>2</sub> 储存的主要候选地,它们 处于高压低温的稳定环境,具有巨大的潜在储存容 量<sup>[42]</sup>,同时,对于已开采的油气藏,地下和地面基 础设施完善,能在注入 CO<sub>2</sub> 过程中节约成本。砂岩 为储存油气和咸水层的常见主要岩石,因其具高孔 隙度和渗透性成为 CO<sub>2</sub> 构造封存最有前途的储 层<sup>[24,43]</sup>。作为占地表岩石 3/4 的碎屑沉积岩,砂岩 主要成分为石英、长石及黏土矿物,其中,碳酸盐、 黏土矿物是沉积阶段生成的特有矿物,在玄武岩和 变质岩中几乎不存在。SONG 等<sup>[44]</sup> 研究发现, 黏土 矿物是储层中最丰富和分布最广泛的无机矿物之 一, 具有独特的层状结构、丰富的表面特性和孔隙 结构, 能直接参与 CO<sub>2</sub> 的物理化学反应, 在酸性条 件下浸析出可沉淀的金属离子, 直接影响流体-岩石 系统的动力学行为和 CO<sub>2</sub> 的实际封存能力。

### 3.1 砂岩矿化封存的试验模拟

近年来,许多学者就砂岩储层的碳封存潜力做 了一系列实验和研究<sup>[45-47]</sup>,在实验模拟不同矿物组 成砂岩的封存效果方面, ZHANG 等<sup>[48]</sup> 指出, 火山 成因砂岩富含火山岩碎片,可以为 CO2 提供活性矿 物。其研究表明,当注入含 10%~20% 活性矿物的 火山成因砂岩时,80%的CO,实现了矿化。若含火 山碎片的砂岩数量较少,岩石孔隙度和渗透率会随 火山碎片的增加以及成岩历史的长度和复杂性而 降低,限制了 CO,的注入速率。为了探究砂岩常见 矿物的反应效果, ABDULWAHAB 等<sup>[49]</sup>在75℃、 28.7 MPa条件下利用实验模拟了 CO<sub>2</sub>-长石砂岩-水 的相互作用,发现长石颗粒的化学性质不稳定,且 受多种因素影响。BOWKER和 SHULER<sup>[50]</sup> 重点 研究了铁方解石、铁白云石和自生黏土矿物含量较 高的砂岩在 CO<sub>2</sub>-水岩作用中发生的水化学性质与 储层矿物学的变化。结果表明, CO2 导致碳酸盐胶 结物、自生黏土和碎屑长石溶解,水样中 Fe<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup>的浓度大幅增加, 矿物溶解引起的渗透性增 加被黏土矿物迁移到孔喉引起的降低所抵消。

#### 3.2 砂岩矿化封存的化学过程

目前还没有专门将 CO<sub>2</sub> 通过矿化封存于砂岩 中的示范工程。一方面,砂岩中矿化反应的时间长, 在数千到百万年之间,短期无法看到成效;另一方 面在砂岩储层中封存,通常依靠构造、流体动力学 圈闭和沉淀协同作用<sup>[51-52]</sup>,如图 2 所示。当超临界 CO<sub>2</sub> 注入深层构造后,会凭借在水中高于分子氧的 溶解度,迅速溶解于水中,实现碳酸盐沉淀及化学 风化的第 1 步<sup>[53]</sup>。在砂岩中能与 CO<sub>2</sub> 发生矿化反 应的矿物成分见表 1,其中,长石会在溶解作用下发 生物性转变,包括自身的结构、孔隙度和渗透性,形 成微孔隙,加快碳酸化的速率;黏土矿物和碳酸盐 在酸性环境中的反应性较高<sup>[54]</sup>,内部含有大量半径 较大的金属阳离子,离子在酸性条件下发生交换时, 矿物的化学结构和离子间作用力在短时间内受到 破坏<sup>[55]</sup>,使其浸出速率加快,金属阳离子与HCO<sub>3</sub>沉 淀,使原本的孔隙明显扩大。在整个反应过程中, 砂岩的结构变化体现在孔隙度和孔隙体积的演变 上<sup>[56]</sup>,对于致密砂岩来说,矿物成分尤其是碳酸盐 和黏土矿物的相对含量,是最重要的控制因素,其 控制着反应的进程、孔喉堵塞现象的发生。



Fig.2 Water-rock reactions after supercritical CO<sub>2</sub> injection

表1 砂岩储层中参与矿化过程的反应

Table I	Reactions involved in the mineralization processes
	in sandstone
矿物	反应方程式
方解石	$CaCO_3+2H^+ \rightleftharpoons Ca^{2+}+CO_2+H_2O$
白云石	$CaMg(CO_3)_2+4H^+ \leftrightarrows Ca^{2+}+Mg^{2+}+2CO_2+2H_2O$
蒙脱石	$\begin{split} & Na_{0.33}(A1,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2\cdot nH_2O \leftrightarrows \\ & 0.33Na^+ + 1.67Al^{3+} + 0.33Mg^{2+} + 4H_4SiO_4 + (n-1)H_2O \end{split}$
绿泥石	$\begin{array}{l} Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8+18H^+\leftrightarrows 5Mg^{2+}+2Al^{3+}+\\ 3H_4SiO_4+5H_2O \end{array}$

4 不同类型岩石 CO2 矿化封存潜力 评估

### 4.1 影响因素

#### 4.1.1 不同类型岩石分布

与沉积岩相比,火山岩在大陆地壳的区域覆盖 率小。从全球尺度看,暴露在各大洲上的火山岩形 成于洋中脊、火山弧等区域,仅占全球陆地表面积 的 6.8%~8%<sup>[57]</sup>,其中,玄武岩占火成岩体积比例 的 77%;而沉积岩占全球表面积的 65%,最常见的 是页岩、砂岩和石灰岩,占沉积岩体积总数的 95%。 中国地质岩性空间分布数据显示,在 8000 多个地 质岩性单元中,目前初步筛选出的玄武岩潜在封存 区域包括峨眉山、塔里木盆地、福建沿海、雷琼半 岛、河北、山东以及吉林火山岩等 7 个区域<sup>[58]</sup>,不 到全国面积的 10%; 而沉积岩面积约 354×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占总面积的 35% 以上。

4.1.2 矿物的多样性与丰度

矿物含量越丰富,浸出速率和固碳效率越高, 可矿化的潜力相对就越大。在玄武岩中,二价阳离 子源于硅酸盐,如橄榄石、辉石、斜长石<sup>[59]</sup>,这类活 性矿物的溶解封存发生得很快(<1a),能贡献约 20%的净CO2封存能力,在较长的时间尺度上(长 达 10 000 a) 略有增加。对于沉积岩, 尤其是在碳酸 盐含量低的岩石中,矿化反应相对较慢,发生在较 长的时间范围内(100~10 000 a), 过程中方解石、 白云石和黏土矿物是参与反应的主要矿物。通常 情况下,固体和溶液间的反应可以通过固体质量 或溶液成分的变化来观察,但 MORES 和 ARVID-SON<sup>[60]</sup> 对沉积岩中碳酸盐矿物的溶蚀动力学研究 后发现,该变量只能表征"净"变化,而不能对溶解 和沉淀过程进行描述,因此需要各参数来耦合动力 学平衡过程,其中就包括矿物的浸出速率。PARK 和 FAN<sup>[61]</sup> 在研究蛇纹石在酸性条件下的溶解特征 时认为,在液相、常规温度下,天然矿物中 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 的浸出速率是整个碳酸盐化过程的决定性因素。 近年来,有诸多学者提出了地球科学中最常用的描 述碳酸盐和硅酸盐矿物溶解速率的方程<sup>[62-64]</sup>,如公 式(8)(9):

 $R = -dm_{\text{calcited}} dt = (A \cdot V \cdot k)(1 - \Omega)^n \qquad (8)$ 

$$R = k \left[ \frac{\alpha (\mathrm{H}^{+})^{Zi}}{\alpha_{\mathrm{M}_{i}}^{Zi^{+}}} \right]^{2}$$
 (9)

式中:*R* 表示溶解速率, mol·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;

m为方解石的摩尔质量,g/mol;

t 为时间, h;

A为固体的总表面积, km<sup>2</sup>;

V为溶液的体积,m3;

k 为速率常数;

n 为反应的阶次;

 $\Omega$ 为饱和状态,即离子活性产物与溶解度产物的比率;

α是交换系数,用于表示  $H^{+}$ 与浸出离子  $Mi^{Zi+}$ ( $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 和  $Al^{3+}$ )活性的阶次关系。

在不同温度和 pH 条件下, R 值不同, 若利用公式(8)和(9)计算相同温度和 pH 下玄武岩和砂岩中单一矿物的浸出速率, 则能发现 R<sub>橄榄石</sub>>R<sub>方解石</sub>, 且 玄武岩中可参与矿化过程的矿物含量还远大于砂 岩。据统计,玄武岩含有约 60% 的斜长石及约 40% 的辉石,其次为橄榄石、角闪石及黑云母。这 些矿物使玄武岩中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>等的总质量百 分比占约 25%<sup>[65]</sup>。

4.1.3 地层水文条件

反应需要三相作用,因此,充足的流体能保证 过程快速有效进行。有研究表明,尽管超镁铁质和 镁铁质类岩石的 CO2 封存能力非常高,但不利的地 质-水文框架,使得它们不是储存的最佳目标体<sup>[66]</sup>。 目前,在火山岩中进行水文勘探还存在许多问题, 尤其是裂谷和断层火山地区,地下水资源不易开发。 根据 SINGHAL 和 GUPTA<sup>[67]</sup>的研究,玄武岩流在 上升过程中形成了大面积的山脊,成为地表水和地 下水流动的障碍;其次,岩屑、火山灰层和致密的玄 武岩流等不透水地层的存在,进一步阻止了地下含 水层的形成和积聚过程。FENT 等<sup>[68]</sup> 对埃塞俄比 亚火山含水层的水文地质框架和地下水质量的调 查发现,火山岩含水层通常储存在火山岩的裂缝和 风化部分,并且水通常以孔隙水、裂隙水、地热水和 矿物结合水4种主要形式体现,影响水文特性和地 质行为。当CO,注入时孔隙中的水不足以支撑矿 化反应进行,超临界态的 CO2 与玄武岩的反应就会 受到显著限制,即使超临界 CO2 在高温高压下有较 强的化学活性,因缺乏流体,CO2可能会以气体形 式存在,大大降低溶解度和反应速率。另外,若以 CO2 水溶液的形式注入,能加快矿化速度,但需要 大量的水来溶解 CO2, 对目标地区的水资源丰富程 度有要求。而在沉积岩储层中,特殊的孔隙结构和 渗透性使其能够有效储存和传输水分。以砂岩为 例, 微观孔隙结构特征决定了含水层的富水性、渗 透性,颗粒相对较大且排列松散的砂岩颗粒易于形 成大量的孔隙<sup>[69]</sup>,积聚地下水,水分通过孔隙间的 连通性流动,形成流动的含水层,以储存更多的水 分,提高水资源的可用性。除此之外,砂岩的渗透 性相对较好,水流能够更容易地在其内部移动,从 水资源的可用性和管理角度来看,砂岩含水层往往 被视为更理想的选择。

### 4.2 封存潜力

在评估 CO<sub>2</sub> 在玄武岩中的储存能力方面,国 外已经进行了大量的工作。MCGRAIL 等<sup>[70]</sup>和 SNæBJöRNSDóTTIR 等<sup>[71]</sup>先后评估了美国、冰岛的 玄武岩储存能力,揭示了玄武岩巨大的储存潜力,其 中,哥伦比亚河玄武岩储层的储存能力>1000 亿 t; 冰岛陆地玄武岩的储存容量约为9530~24700亿t, 近海地区可以封存高达 70000 亿 t CO2。中国也开 展了针对玄武岩储存容量的系统评估和利用研究。 高志豪等<sup>[72]</sup>分析了目前主要的玄武岩矿化封存潜 力的评价方法,包括单位矿化法、矿物置换法和孔 隙充填法,并指明了其优缺点。ZHANG 等<sup>[73]</sup> 对中 国玄武岩矿化封存潜力的计算结果得出,理论上每 单位体积玄武岩的矿化能力为 378~680 kg/m<sup>3</sup>, 而 沉积岩的单位体积的矿化能力仅为 2.63~124.41 kg/m<sup>3[74]</sup>。从具体数据来看,李鹏春等<sup>[75]</sup>对广东雷 州半岛总面积约3940 km<sup>2</sup>火山岩的 CO<sub>2</sub> 矿化封存 潜力评估结果表明, 雷州半岛火山岩总体积约为 257 km<sup>3</sup>, CO<sub>2</sub>理论矿化封存量介于 19~459 亿 t。 吾尔娜等<sup>[76]</sup>研究了济阳坳陷玄武岩油气藏的矿物 固碳能力,封存潜力为 39.45 亿 t, 油气储层的封存 能力约为2300万t。除了封存能力,固碳效率更能 有效表征进入储层的 CO2 的实际利用情况, 是决 定 CO, 有效封存量的重要参数。福建省自然资源 厅对漳州一带的玄武岩资源进行了调查,结果发现, 该地区 4.55 t 玄武岩最多可固定 1 t 的 CO<sub>2</sub>, 理论固 碳率为 0.22。根据矿化机理, ZHANG 等<sup>[73]</sup> 提出了 玄武岩中 CO, 矿物储量的计算方式(10):

$$M_{\rm CO_2 eff} = m_{\rm CO_2} \cdot C_{\rm eff} = \sum \frac{\rho_r \cdot f_i}{n_i \cdot n_{\rm CO_2}} \cdot A \cdot H \cdot (1 - \varphi) \cdot C_{\rm eff}$$
(10)

式中:  $m_{CO_2}$ 、 $M_{CO_2}$ 分别为单位体积的理论碳储量和 CO<sub>2</sub>的理论储存能力, t/m<sup>3</sup>;

 $C_{\text{eff}}$ 表示有效储存系数;

ρ<sub>r</sub>为玄武岩的密度, t/m<sup>3</sup>;

f<sub>i</sub>为玄武岩中CaO、MgO、FeO的质量分数;

n<sub>i</sub>为玄武岩中 CaO、MgO、FeO 的分子量, g/mol; n<sub>CO</sub>,为 CO<sub>2</sub> 的分子量, g/mol;

A是玄武岩储集区面积, km<sup>2</sup>

H是玄武岩储层的厚度,m。

 $\varphi$ 是玄武岩储层孔隙率。

该式仅适用于玄武岩。目前来看,针对于常规 地质结构,还未提出矿化机制中的固碳效率计算方 程,只能根据 Bachu<sup>[77]</sup> 定义的在多孔介质中给定孔 隙体积与 CO<sub>2</sub> 可进入或占据的体积之比来计算大 体范围,如公式(11):

$$E = \frac{V_{\rm CO_2}}{V_{\rm \phi}} \tag{11}$$

式中: $V_{\varphi}$ 、 $V_{CO_2}$ 分别为孔隙体积和 CO<sub>2</sub> 可进 入或占据的体积,  $m^3$ 。

### 5 结论

(1)矿化封存是多种碳减排手段中优势明显、 封存潜力高的技术之一。从储存容量来看,自然界 众多岩石具有丰富的孔隙结构,内部裂隙相互交织, 能形成天然的储存空间,封存数量可观的 CO<sub>2</sub>,理 论封存潜力达数万亿吨;从环境和资源利用价值方 面来看,在矿山开采区域,通过矿化封存的方式,周 边的特定原料能与 CO<sub>2</sub>反应形成稳定矿物,从而处 理尾矿或者受污染土壤中的重金属,实现一定规模 的封存和资源化开发应用;从长期封存来看,矿化 产物有牢固的化学键,在外部轻微的地质变化下, 依然保持较高的稳定性。

(2)岩石封存潜力很大程度上受控于分布面积、 矿化矿物的多样性与速率以及含水层等因素的影 响。因此,深入研究沉积岩,尤其是碎屑岩中的矿 化封存能力,将为玄武岩的矿化封存提供重要的相 互补充发展路径。但也面临巨大挑战:成本高;矿 化耗水多,要用工业废水和海水;需加强环境安全 评估和长期监测。国内丰富的矿化资源、新兴技术 发展和政策支持将为其发展提供保障,在加强技术 研发、优化经济性和规模化应用的基础之上,矿化 封存将是未来实现碳中和的重要路径。

#### 参考文献:

- Global CCS Institute. The global status of CCS report 2021 [R]. Australia:Global CCS Institute, 2021.
- [2] SHUKLA R, RANJITH P, HAQUE A, et al. A review of studies on CO<sub>2</sub> sequestration and caprock integrity[J]. Fuel, 2010, 89(10): 2651-2664.
- [3] HARTMANN J, WEST A J, RENFORTH P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification[J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(2): 113-149.
- [4] SECRETARY OF ENERGY ADVISORY BOARD. Report of the task force on RD&D strategy for CO<sub>2</sub> utilization and/or negative emissions at the gigatonne scale [R]. Washington, DC: United States Department of Energy, 2016.
- [5] POGGE VON STRANDMANN P A E, BURTON K W, SNæBJöRNSDÓTTIR S O, et al. Rapid CO<sub>2</sub> mineralisation into calcite at the CarbFix storage site quantified using calcium isotopes[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1983.
- [6] BENSON S M, BENNACEUR K, COOK P, et al. Carbon Capture and Storage [M]// Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future. Cambridge: Cambridge University Press. 2012; 993-1068.

- [7] BACHU S. CO<sub>2</sub> storage in geological media: role, means, status and barriers to deployment[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(2): 254-273.
- [8] DE CONINCK H, BENSON S M. Carbon dioxide capture and storage: issues and prospects[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2014, 39(1): 243-270.
- [9] ABDOLHOSSEINI QOMI M J, MILLER Q R S, ZARE S, et al. Molecular-scale mechanisms of CO<sub>2</sub> mineralization in nanoscale interfacial water films[J]. Nature Reviews Chemistry, 2022, 6(9): 598-613.
- [10] SN&BJöRNSDÓTTIR S Ó, SIGFúSSON B, MARIENI C, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(2): 90-102.
- [11] GADIKOTA G. Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization[J]. Communications Chemistry, 2021, 4(1): 23.
- [12] SEIFRITZ W. Mirrors to halt global warming?[J]. Nature, 1989, 340(6235): 603.
- [13] LACKNER K S, WENDT C H, BUTT D P, et al. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals[J]. Energy, 1995, 20(11): 1153-1170.
- [14] GERDEMANN S J, DAHLIN D C, O'CONNOR W K. Carbon dioxide sequestration by aqueous mineral carbonation of magnesium silicate minerals [C]. //GALE J, KAYA Y. Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference. Kyoto, 2003: 677-682.
- [15] HUIJGEN W J J, WITKAMP G J, COMANS R N J. Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO<sub>2</sub> sequestration process[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(13): 4242-4251.
- [16] BEAULIEU E, GODDéRIS Y, DONNADIEU Y, et al. High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(5): 346-349.
- [17] KELEMEN P B, MATTER J. In situ carbonation of peridotite for CO<sub>2</sub> storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(45): 17295-17300.
- [18] RAJENDRAN S, NASIR S. Mapping of Moho and Moho Transition Zone (MTZ) in Samail ophiolites of Sultanate of Oman using remote sensing technique[J]. Tectonophysics, 2015, 657(8): 63-80.
- [19] WANG F, DREISINGER D. Status of CO<sub>2</sub> mineralization and its utilization prospects[J]. Miner and Miner Mater, 2022, 1(4).
- [20] BAŁDYGA J, HENCZKA M, SOKOLNICKA K. Utilization of carbon dioxide by chemically accelerated mineral carbonation[J]. Materials Letters, 2010, 64(6): 702-704.
- [21] BOBICKI E R, LIU Q, XU Z, et al. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2): 302-320.
- [22] WILSON S, HARRISON A L, DIPPLE G M, et al. Offsetting of CO<sub>2</sub> emissions by air capture in mine tailings at the Mount Keith Nickel Mine, western Australia: rates, controls and pro-

spects for carbon neutral mining[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 25(6): 121-140.

- [23] HARRISON A L, POWER I M, DIPPLE G M. Accelerated carbonation of brucite in mine tailings for carbon sequestration[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(1): 126-134.
- [24] KIM K, KIM D, NA Y, et al. A review of carbon mineralization mechanism during geological CO<sub>2</sub> storage[J]. Heliyon, 2023, 9(12): e23135.
- [25] DE HEER J. The principle of Le Châtelier and Braun[J]. Journal of Chemical Education, 1957, 34(8): 375.
- [26] OLSSON J, BOVET N, MAKOVICKY E, et al. Olivine reactivity with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on a microscale: implications for carbon sequestration[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 77(1): 86-97.
- [27] SANDALOW D, AINES R, FRIEDMANN J, et al. Carbon Mineralization Roadmap Draft October 2021 [R]. Livermore, United States: Lawrence Livermore National Lab, 2021.
- [28] 陈霞玉,陈立辉,陈喝,等.中国中一东部地区新生代玄武岩的 分布规律与面积汇总 [J].高校地质学报, 2014, 20(4): 507-519. CHEN X Y, CHEN L H, CHEN Y, et al. Distribution summary of cenozoic basalts in central and eastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(4): 507-519.
- [29] 李国玉, 吕鸣岗. 中国含油气盆地图集 (第二版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
  LI G Y, LYU M G. Atlas of China's Petroliferous Basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [30] RAZA A, GLATZ G, GHOLAMI R, et al. Carbon mineralization and geological storage of CO<sub>2</sub> in basalt: mechanisms and technical challenges[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 229(6): 104036.
- [31] WOLFF-BOENISCH D, GISLASON S R, OELKERS E H. The effect of crystallinity on dissolution rates and CO<sub>2</sub> consumption capacity of silicates[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(4): 858-870.
- [32] COX K G, BELL J D, PANKHURST R J. The interpretation of igneous rocks [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [33] JIA J, LIANG Y, TSUJI T, et al. Ab initio molecular dynamics study of carbonation and hydrolysis reactions on cleaved quartz (001) surface[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(8): 4938-4948.
- [34] GISLASON S R, HANS P E. Meteoric water-basalt interactions. I: a laboratory study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(10): 2827-2840.
- [35] KASZUBA J P, WILLIAMS L L, JANECKY D R, et al. Immiscible CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluids in the shallow crust [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7(10): 1-11.
- [36] GUO J Q, LI M J, HE Y L, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO<sub>2</sub>) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258(4): 115437.
- [37] XIONG W, WELLS R K, HORNER J A, et al. CO<sub>2</sub> Mineral se-

questration in naturally porous basalt[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5(3): 142-147.

- [38] GISLASON S, WOLFF-BOENISCH D, STEFANSSON A, et al. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: a pre-injection overview of the CarbFix project[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(3): 537-545.
- [39] OELKERS E H, OELKERS E H, OELKERS E H, et al. Using stable Mg isotope signatures to assess the fate of magnesium during the in situ mineralisation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S at the CarbFix site in SW-Iceland[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019, 245(1): 542-555.
- [40] MCGRAIL B P, SPANE F A, AMONETTE J E, et al. Injection and monitoring at the Wallula basalt pilot project[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 2939-2948.
- [41] WHITE S K, SPANE F A, SCHAEF H T, et al. Quantification of CO<sub>2</sub> mineralization at the Wallula basalt pilot project[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(22): 14609-14616.
- [42] BACHU S. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change[J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(9): 953-970.
- [43] ADU-GYAMFI B, AMPOMAH W, TU J, et al. Assessment of chemo-mechanical impacts of CO<sub>2</sub> sequestration on the caprock formation in Farnsworth oil field, Texas[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 13023.
- [44] SONG Z, YANG L, JIANG F, et al. The mechanism of clay mineral transformation in CO<sub>2</sub> geological storage and its impact on long-term storage potential[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 242(11): 213192.
- [45] WANG Z, TANG X, JING T, et al. Comparison of mineral transformation in CO<sub>2</sub> geological storage under CO<sub>2</sub>-watersandstone and mudstone reactions[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 242(11): 213215.
- [46] SAMBO C, LIU N, SHAIBU R, et al. A technical review of CO<sub>2</sub> for enhanced oil recovery in unconventional oil reservoirs[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 221(2): 111185.
- [47] AL-SHARGABI M, DAVOODI S, WOOD D A, et al. Carbon dioxide applications for enhanced oil recovery assisted by nanoparticles: recent developments[J]. ACS Omega, 2022, 7(12): 9984-9994.
- [48] ZHANG S, DEPAOLO D J, XU T, et al. Mineralization of carbon dioxide sequestered in volcanogenic sandstone reservoir rocks[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 18(10): 315-328.
- [49] BELLO A M, AL-YASERI A, AMAO A O, et al. CO<sub>2</sub>-rockbrine interactions in feldspar-rich sandstones that underwent intense heating[J]. ACS Omega, 2024, 9(29): 31578-31585.
- [50] BOWKER K A, SHULER P J. Carbon dioxide injection and resultant alteration of the weber sandstone, Rangely Field, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(9): 1489-1499.
- [51] BACHU S, GUNTER W D, PERKINS E H. Aquifer disposal of

CO<sub>2</sub>: hydrodynamic and mineral trapping[J]. Energy Conversion and Management, 1994, 35(4): 269-279.

- [52] ZHANG L, ZHANG T, ZHAO Y. A review of interaction mechanisms and microscopic simulation methods for CO<sub>2</sub>-waterrock system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 223-238.
- [53] LERMAN A, MACKENZIE F T. Carbonate minerals and the CO<sub>2</sub>-carbonic acid system [J]. Encyclopedia of Geochemistry; Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2018, (1): 206-226.
- [54] ESPINOZA D N, SANTAMARINA J C. Clay interaction with liquid and supercritical CO<sub>2</sub>: the relevance of electrical and capillary forces[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 10(9): 351-362.
- [55] 韦莉,田玉玲.蒙脱石与土酸反应的实验研究 [J]. 油田化学, 1998, 15(3): 237-240.
   WEI L, TIAN Y L. An experimental study on reaction of montmorillonite with mud acid [J]. Oilfield Chemistry, 1998, 15(3): 237-240.
- [56] WU S, ZOU C, MA D, et al. Reservoir property changes during CO<sub>2</sub>-brine flow-through experiments in tight sandstone; implications for CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery in the Triassic Chang 7 Member tight sandstone, Ordos Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 179(8): 200-210.
- [57] BLATT H, JONES R L. Proportions of exposed igneous, metamorphic, and sedimentary rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86(8): 1085-1088.
- [58] CREBFIX O. Pre-feasibility screening study for CO<sub>2</sub> mineral storage potential in China [R]. Baejarhals 1, 110 Reykjavik, Iceland; 2021, 1-58.
- [59] OELKERS E H, GISLASON S R, MATTER J. Mineral carbonation of CO<sub>2</sub>[J]. Elements, 2008, 4(5): 333-337.
- [60] MORSE J W, ARVIDSON R S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(1/2): 51-84.
- [61] PARK A H A, FAN L S. CO<sub>2</sub> mineral sequestration: physically activated dissolution of serpentine and pH swing process[J].
   Chemical Engineering Science, 2004, 59(22/23); 5241-5247.
- [62] MORSE J W, BERNER R A. Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water; I, a kinetic origin for the lysocline[J]. American Journal of Science, 1972, 272(9): 840-851.
- [63] OELKERS E H. General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(21): 3703-3719.
- [64] OELKERS E H, SCHOTT J. An experimental study of enstatite dissolution rates as a function of pH, temperature, and aqueous Mg and Si concentration, and the mechanism of pyroxene/ pyroxenoid dissolution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(8): 1219-1231.
- [65] 李万伦,陈晶,贾凌霄,等. 玄武岩 CO<sub>2</sub> 地质封存研究进展 [J]. 地质论评, 2022, 68(1): 1-11.

LI W L, CHEN J, JIA L X, et al. Research progress of CO<sub>2</sub> geological sequestration in basalts[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 1-11.

- [66] MARINI L. Chapter 7 Reaction Path Modelling of Geological CO<sub>2</sub> Sequestration [M]. MARINI L. Developments in Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2007: 319-409.
- [67] SINGHAL B B S, GUPTA R P. Hydrogeology of volcanic rocks[J]. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, 1999: 261-274.
- [68] FENTA M C, ANTENEH Z L, SZANYI J, et al. Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 11(10): 100408.
- [69] 王苏健, 冯洁, 侯恩科, 等. 砂岩微观孔隙结构类型及其对含水层富水性的影响: 以柠条塔井田为例 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3236-3244.
  WANG S J, FENG J, HOU E K, et al. Microscopic pore structure types of sandstone and its effects on aquifer water abund.

ture types of sandstone and its effects on aquifer water abundance: taking in Ningtiaota coal mine as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3236-3244.

- [70] MCGRAIL B P, SCHAEF H T, HO A M, et al. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111: B12201.
- [71] SNæBJöRNSDÓTTIR S Ó, WIESE F, FRIDRIKSSON T, et al. CO<sub>2</sub> storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 4585-4600.
- [72] 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. GAO Z H, XIA C Y, LIAO S L, et al. Progress of methods for assessing CO<sub>2</sub> mineralization storage potential in basalt [J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(1): 66-75.

- ZHANG L, WEN R, LI F, et al. Assessment of CO<sub>2</sub> mineral storage potential in the terrestrial basalts of China[J]. Fuel, 2023, 348(11): 128602.
- [74] ZHANG L. Saline aquifer storage of CO<sub>2</sub> from natural gas reservoirs in the South China Sea: trapping mechanisms and project design[J]. China University of Petroleum (East China), 2011, 369(8): 131744.
- [75] 李鹏春, 江静练, 程锦辉, 等. 广东雷州半岛火山岩二氧化碳 矿化封存潜力评估 [J]. 高校地质学报, 2023, 29(1): 76-84.
  LI P C, JIANG J L, CHENG J H, et al. Assessment of carbon dioxide mineralization sequestration potential of volcanic rocks in Leizhou Peninsula, Guangdong Province, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(1): 76-84.
- [76] 吾尔娜,陈琦,王世伟,等.济阳坳陷玄武岩油气藏储层的CO<sub>2</sub>封存潜力研究[J].西部探矿工程,2017,29(12):98-100.
  WU E N, CHEN Q, WANG S W, et al. Study on CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Basalt Reservoir Reservoirs in Jiyang Depression [J]. West-China Exploration Engineering, 2017, 29(12): 98-100.
- [77] BACHU S. Review of CO<sub>2</sub> storage efficiency in deep saline aquifers[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40(9): 188-202.

## Study of CO<sub>2</sub> mineralization and storage mechanism in basalt and sandstone

MA Xinrui<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, LIANG Jie<sup>2,3,4,5,6\*</sup>, LI Qing<sup>2,3,4,5,6\*</sup>, CHEN Jianwen<sup>2,3,4,5,6</sup>, YUAN Yong<sup>2,3,4,5,6</sup>, LUO Di<sup>2,3,4,5,6</sup>, ZHAO Hualin<sup>2,3,4,5,6</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geology Survey, Qingdao 266237, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 4 Qingdao Key Laboratory of Offshore CO<sub>2</sub> Geological Storage, Qingdao 266237, China; 5 Qingdao Engineering Research Center of Offshore CO<sub>2</sub> Geological Storage, Qingdao 266237, China; 6 Shandong Province Engineering Research Center of Offshore CO<sub>2</sub> Geological Storage, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Anthropogenic emissions of  $CO_2$  pose a serious threat to the human living environment and lead to significant changes in the ecosystem. Geological storage, which has been proposed in recent years as one of the technologies to deal with excess  $CO_2$  in the atmosphere, can be categorized into physical storage, which relies on the physical properties of the pores of the reservoir rock, and chemical storage, which is realized through the reaction of  $CO_2$  with the surrounding rocks. The chemical method of mineralized storage utilizes the process of converting  $CO_2$  into stable solid carbonates to achieve the goal of long-term storage, which is regarded as the safest and most stable storage technology. By discussing the principle and potential of  $CO_2$  mineralization, we comparatively analyzed the reaction mechanisms, influencing factors, mineralization rates, and storage capacities in different rocks, and summarized the advantages and disadvantages of  $CO_2$  mineralization in basalt and sandstone. Combined with two basalt mineralization demonstration projects that have been successfully implemented globally at present, we put forward the ideas and prospects for  $CO_2$  mineralization and storage in clastic rock reservoirs.

Key words: CCUS; CO<sub>2</sub> geological storage; CO<sub>2</sub>-water-rock reaction; CO<sub>2</sub> mineralization mechanism