

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.04.03

引用格式: 邱添, 曾令森, 申婷婷. 基性-超基性岩碳酸盐化固碳效应研究进展[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 20-32. (Qiu T, Zeng L S, Shen T T. Progresses on carbon sequestration through carbonation of mafic-ultramafic rocks[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 20-32.)

基性-超基性岩碳酸盐化固碳效应研究进展

邱添^{1,2}, 曾令森¹, 申婷婷¹

(1. 中国地质科学院地质研究所自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 人为排放 CO₂ 导致全球气候变暖已经对人类生存和发展造成威胁, 碳捕获与封存是世界公认的实现碳减排的主要途径之一。基性-超基性岩碳酸盐化固碳作为地质碳汇之一, 是一种经济、安全且长久的碳捕获与封存方式, 引起了国际社会越来越多的重视。本文阐述了自然条件下基性-超基性岩碳酸盐化反应过程, 分析其固碳机理和影响基性-超基性岩碳酸盐化速率的主要因素。在此基础上, 梳理并总结了目前国际上基性-超基性岩固碳技术的研究进展和典型应用实例, 认为全球广泛分布的基性-超基性岩具有巨大的固碳潜力。该技术的推广和应用将对未来大气 CO₂ 减排具有重要意义。

关键词: 基性-超基性岩; 硅酸盐矿物; 碳酸盐化; 二氧化碳; 碳捕获与封存

中图分类号: P588; P59; X14

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)04-0020-13

0 引言

全球性气候变暖已经成为一个威胁人类生存和发展的重大问题, 人为排放 CO₂ 是导致全球变暖最主要的因素, 直接影响全球生态环境安全^[1]。如今, 全球大气中 CO₂ 浓度比人类历史上的任何时候都要高。过去十年中大气 CO₂ 浓度更是以每年 2.3×10^{-6} 的速度增长, 比自然条件下大气 CO₂ 浓度变化快近 100 倍^[2]。为应对全球气候变化的严峻形势, 2015 年《巴黎协定》明确规定了全球增温控制在 1.5~2℃ 并倡导各国自主减排^[3]。世界各国积极响应并探索减排的有效措施, 中国政府也做出 2030 年前实现碳达峰, 在 2060 年前实现碳中和的郑重承诺。大气中 CO₂ 浓度的增加在很大程度上归因于化石燃

料的使用^[4], 然而未来几十年, 全球能源消费中化石燃料仍将占据主导地位, 研发 CO₂ 减排以及捕获与封存新技术是国际社会当前迫切需要解决的问题。

碳捕获与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 技术被公认为是最终实现 CO₂ 零排放的主要途径之一^[4-5]。该技术将大量排放的 CO₂ 从排放源分离, 利用不同封存机制将 CO₂ 存储在包括陆地生物圈在内的封存地点, 而非直接排入大气圈^[6]。其中, 地质封存是指将气态、液态或超临界 CO₂ 注入沉积盆地下的地质体/构造 (如深部咸水层、枯竭油气田和煤层等) 中, 利用储层上部的圈闭构造阻止 CO₂ 在浮力作用下向上运移 (封存机制: 构造/地层封存), 其中少量 CO₂ 封存在岩石介质的孔隙中 (残余气体封存), 随着时间推移溶解在地下水中 (溶解封存), 并与周围岩石发生反应形成稳定碳酸

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-08-13。

基金项目: 国家自然科学基金“新疆萨尔托海石英菱镁岩相关的金矿床成矿流体特征及其对矿床成因的限定 (编号: 41703053)”、“喜马拉雅造山带中生代岩浆作用与印度大陆边缘构造动力学过程 (编号: 92055202)”、“西南天山超深蛇纹岩和其包裹的榴辉岩岩石学及其折返机制研究 (编号: 41782072)”、第二次青藏高原科学考察“典型地区岩石圈组成、演化与深部过程 (编号: 2019QZKK0702)”、中国地质调查局“全国地质碳汇碳储评价与区划 (编号: DD20221817)”、中国地质科学院地质研究所基本科研业务费“阿尔巴尼亚布尔齐泽不同类型铬铁矿中的矿物包裹体特征及指示意义 (编号: J1903)”、“喜马拉雅造山带淡色花岗岩成因及成矿效应 (编号: J1901)”和南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项“大洋钻探科学研究——南海重大基础地质问题与首钻选址 (编号: GML2019ZD0201)”项目联合资助。

第一作者简介: 邱添 (1987—), 女, 助理研究员, 主要从事矿床地球化学研究工作。Email: tianqiu@pku.edu.cn。

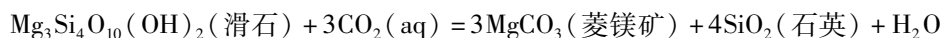
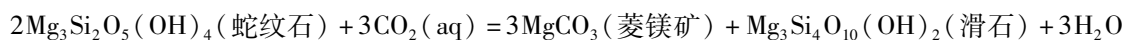
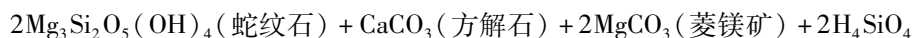
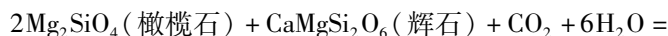
通信作者简介: 曾令森 (1970—), 男, 研究员, 从事构造地质和地球化学研究工作。Email: lzeng1970@163.com。

盐矿物(矿物封存)^[7-12]。然而,以上常规地质封存技术在广泛的应用推广中面临着挑战:沉积地层中岩石的反应活性普遍较低,且缺少形成碳酸盐矿物的二价金属阳离子,矿物封存受到制约,真正完成地质封存可能需要数千年^[7];注入的大部分二氧化碳将长期停留在气态、液态或超临界状态,并存在迁移回到大气中的可能性^[13]。

基性-超基性岩矿物碳酸盐化作为更有优势的碳封存技术,可以将CO₂快速转变为稳定的碳酸盐矿物,实现长久固碳,且不需考虑CO₂返回大气的风险,在增加储存安全性的同时也降低了对盖层岩石的依赖,使得CO₂封存工程潜在的健康、安全以及环境风险降到最低^[14-16]。地球上广泛分布的基性-超基性岩(陆地和海洋,包括大陆溢流玄武岩、洋底玄武岩和地幔橄榄岩等),为CO₂封存提供了一个巨大的碳储空间^[17-18]。本文旨在通过阐述自然界基性-超基性岩碳酸盐化的过程及其固碳机理并梳理总结目前国际上关于基性-超基性岩固碳技术的研究进展和美好展望,加深对基性-超基性岩碳酸盐化过程的理解,提高对此项固碳技术的认识和重视。

1 基性-超基性岩碳酸盐化固碳机理

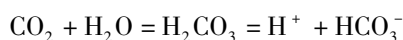
Seifritz 最先提出基性-超基性岩碳酸盐化作



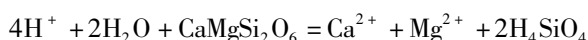
2 自然界基性-超基性岩碳酸盐化过程及其固碳效应

自然界中硅酸盐风化,尤其是基性-超基性岩(玄武岩和地幔橄榄岩)碳酸盐化过程对于调节全球大气CO₂含量起着重要作用^[30-33]。显生宙以来地球上弧-陆碰撞发生的古地理位置与冰川作用的强相关性,揭示了数百万年时间尺度上全球冰期-间冰期的气候转变与低纬度基性-超

用可以封存CO₂^[14]。自然界基性-超基性岩石中主要矿物为橄榄石、辉石和基性斜长石,蚀变矿物主要为蛇纹石,这些矿物均富含高浓度的Ca²⁺和Mg²⁺等二价阳离子,是矿化封存CO₂的首选岩石类型。在一定温压条件范围内,CO₂快速溶解在水中,形成pH值为3~5的酸性溶液,反应方程式为



含CO₂的酸性溶液与富含Ca²⁺和Mg²⁺的硅酸盐矿物反应式为



一方面消耗H⁺,使pH升高,有利于碳酸盐矿物沉淀,另一方面促使硅酸盐矿物溶解,提供Ca²⁺和Mg²⁺等二价阳离子,与CO₂结合形成稳定的碳酸盐矿物。

产物中碳酸盐矿物的种类多样,与反应过程中阳离子的种类、体系pH和温度有关。例如:Ca²⁺易于在<300℃条件下与CO₂反应,当溶液过饱和,沉淀出方解石或霏石^[19-20];在温度>65℃条件下,Mg²⁺过饱和溶液中沉淀出菱镁矿和白云石,而温度较低时则会形成含水碳酸盐矿物,如水菱镁矿[MgCO₃·3H₂O]和球碳镁石[Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·5H₂O]等^[21-25]。基性-超基性岩石中的主要矿物碳酸盐化涉及到的化学反应均为正向进行的自发放热反应,方程式为^[13,15,25-29]

基性岩的出露面积及其风化作用吸收CO₂的能力有关^[32]。在低纬度温暖潮湿的热带地区,大规模弧-陆碰撞导致基性-超基性岩逆冲推覆至浅地表,易发生化学风化,增加CO₂吸收量,从而驱动全球变冷。

全球绝大部分洋底和>5%的陆地面积由玄武岩组成(图1)。虽然陆地上的玄武岩相对较少,但大陆及火山岛上玄武岩碳酸盐化吸收的CO₂含量占陆地上所有硅酸盐风化作用吸收CO₂的30%^[13],显示出明显的固碳优势。在洋底,最大规

模的 CO_2 吸收发生于洋底玄武岩的碳酸盐化过程, 洋底火山地热系统中的玄武岩从其根部的岩浆脱气过程中吸收 CO_2 。洋壳通常厚 6 ~ 7 km。在全球范围内具有显著一致的层序^[34-35]。洋脊侧翼的热液环流集中在洋壳最上层 1 km 处, 使洋壳广泛发生 $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{玄武岩}$ 相互作用。洋底热液活动

引起玄武岩碳酸盐化的过程每年可吸收 40 Mt CO_2 ^[36-37]。通过对冰岛 3 个玄武岩型地热田钻孔中碳酸盐矿物的 CO_2 测量, 认为每立方米年轻、未蚀变的玄武岩可储存的 CO_2 超过 0.1 t^[38], 并以此推算洋中脊可存储的 CO_2 为 $1 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^5$ Gt (超过所有化石燃料产生的 CO_2 总量)^[39]。

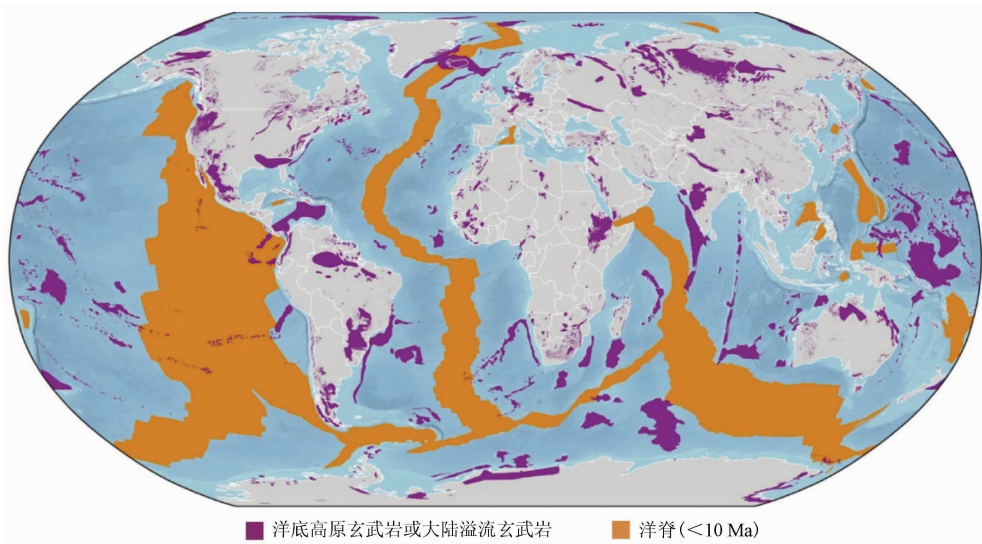


图 1 大陆玄武岩、洋底高原玄武岩和洋中脊 (<10 Ma) 全球分布^[13]

Fig. 1 Global distribution of continental basalts, oceanic plateau basalts and mid-ocean ridges (<10 Ma)^[13]

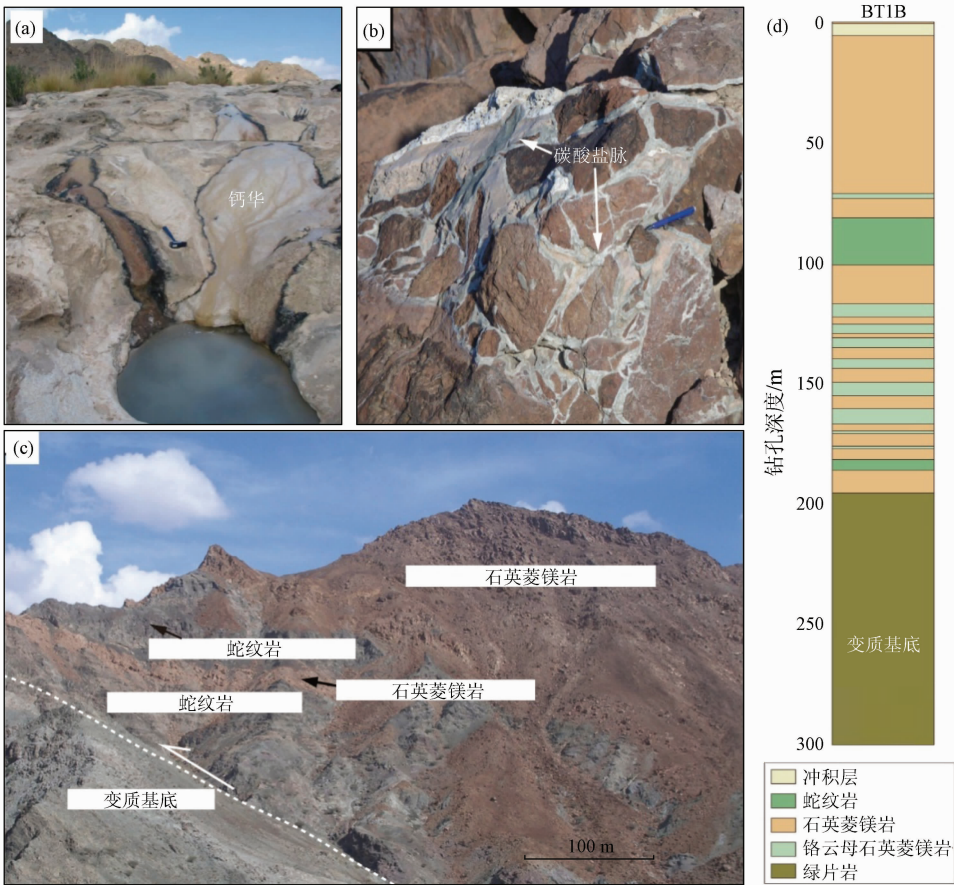
地幔橄榄岩通常位于大洋 6 km 或大陆 40 km 深度以下, 当被大型逆冲断层推覆至浅地表, 其与地表水以及大气中 CO_2 处于极不平衡状态, 易发生碳酸盐化反应。全球主要构造缝合带(古板块边界)普遍发育蛇绿岩, 其中的地幔橄榄岩往往发生不同程度碳酸盐化蚀变, 形成含碳酸盐矿物的多种蚀变矿物组合^[40-41]。阿曼 Semail 蛇绿岩地幔橄榄岩碳酸盐化的规模最大、研究程度最高^[31, 42-45]。Semail 蛇绿岩代表沿逆冲断层推覆上来的洋壳残片, 出露地表的地幔橄榄岩由于低温风化作用形成大面积钙华和微晶碳酸盐脉(图 2(a), (b))。穿透蛇绿岩的钻孔岩心(例如 BT1B 号钻孔获取总长约 300 m 的连续岩心, 由 200 m 石英菱镁岩夹少量蛇纹岩(上部)和 100 m 绿片岩相变质基底(下部)组成)显示, 逆冲推覆地幔橄榄岩几乎完全碳酸盐化转变为(铬云母)石英菱镁岩(图 2(c), (d))。全球不同蛇绿岩中常出现地幔橄榄岩-蛇纹岩-碳酸盐滑石片岩-石英菱镁岩的蚀变分带或晕圈, 如加拿大不列颠哥伦比亚 Atlin 蛇绿岩(图 3(a))^[46]、中国西藏罗布莎(图 3(b))^[47] 以及新疆达拉布特蛇绿岩(图 3(c)-(f))^[48], 代表了地幔橄榄岩发生

碳酸盐化反应不同阶段的产物。石英菱镁岩以石英、碳酸盐矿物(菱镁矿和白云石)、铬云母、少量黄铁矿和残余铬尖晶石为特征矿物组合, 是地幔橄榄岩与含 CO_2 流体交代反应的终端产物^[49-50]。岩相学证据和相图关系揭示了地幔橄榄岩碳酸盐化反应转变为石英菱镁岩的 3 阶段过程: ①地幔橄榄岩先蚀变形成蛇纹岩(主要矿物组合: 蛇纹石 + 磁铁矿)(图 4(a)); ②随着体系 CO_2 含量逐渐升高, 滑石和菱镁矿结晶并从边部或裂隙交代蛇纹石, 蛇纹岩逐渐转变为碳酸盐滑石片岩(滑石 + 菱镁矿 + 磁铁矿)(图 4(a), (b)); ③滑石分解形成球状石英集合体和菱镁矿(图 4(c)), 随着反应不断进行, 球状石英集合体逐渐转变为粗粒、等粒结构的石英, 与菱镁矿镶嵌共生, 形成石英菱镁岩(石英 + 菱镁矿 ± 铬云母)^[51](图 4(d))。

世界上大量存在的碳酸盐化地幔橄榄岩(包括石英菱镁岩)证明自然界中超基性岩固碳效应是普遍存在且重要的。Semail 蛇绿岩体长约 350 km, 宽约 40 km, 平均厚度为 5 km, 其中 30% 为地幔橄榄岩^[52]。根据 Semail 蛇绿岩中碳酸盐化地幔橄榄岩和碳酸盐脉的体积并结合碳酸盐化时代(^{14}C 定年

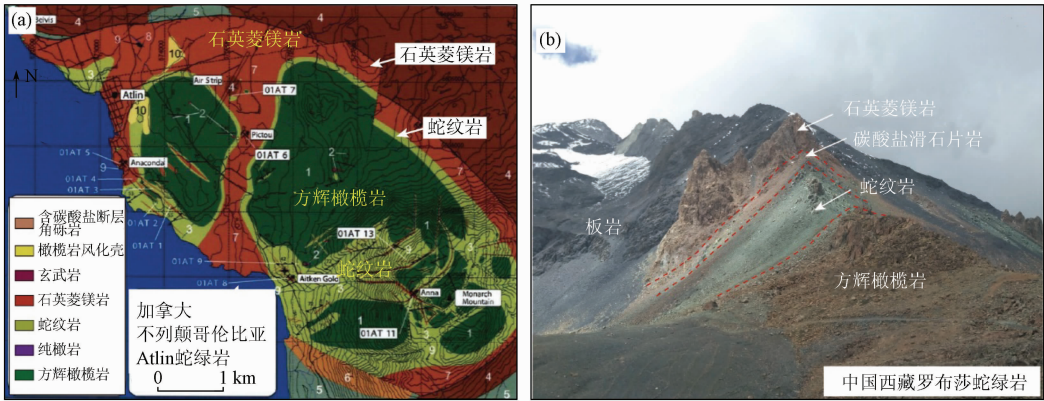
获得平时年龄为 2.6×10^4 a), 认为自然条件下 Semail 蛇纹岩每年封存 CO_2 大约 $10^4 \sim 10^5 \text{ t}^{[31]}$ 。Kelemen 和 Matter 估算了 Semail 蛇纹岩中矿物原位碳

酸盐化封存 CO_2 的巨大潜力：若橄榄岩可以封存 $\text{CO}_2 1 \text{ wt\%}$, 整个 Semail 蛇纹岩可封存现今大气中 CO_2 总量的 1/4；如果将 Semail 蛇纹岩地幔橄榄岩



(a) 碱性热泉附近形成大面积钙华^[31]；(b) 微晶碳酸盐脉胶结碳酸盐化橄榄岩；(c) 石英菱镁岩与下伏变质基底呈断层接触，石英菱镁岩中含少量蛇纹岩夹层/团块^[42]；(d) 穿透蛇纹岩的钻孔 BT1B，显示地幔橄榄岩几乎完全碳酸盐化，转变为石英菱镁岩和铬云母石英菱镁岩^[44-45]

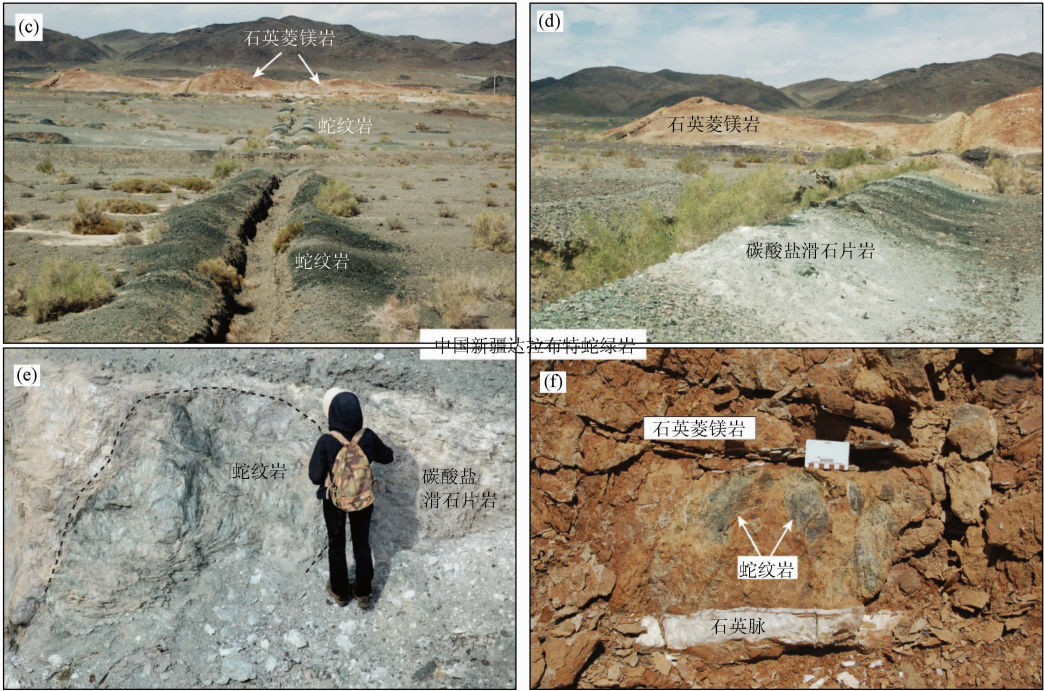
图 2 阿曼 Semail 蛇纹岩中碳酸盐化地幔橄榄岩的野外照片及钻孔柱状图
Fig. 2 Field photographs and downhole stratigraphy of core BT1B of carbonated mantle peridotite in the Semail ophiolite, Oman



(a) 加拿大不列颠哥伦比亚 Atlin 蛇纹岩的平面展布图，显示方辉橄榄岩 – 蛇纹岩 – 石英菱镁岩的蚀变晕圈^[46]；(b) 中国西藏罗布莎蛇纹岩中方辉橄榄岩经历不同程度碳酸盐化反应形成方辉橄榄岩 – 蛇纹岩 – 碳酸盐滑石片岩 – 石英菱镁岩的蚀变带^[47]

图 3-1 全球不同蛇纹岩中碳酸盐化地幔橄榄岩的蚀变带/晕圈

Fig. 3 – 1 Alteration zones or halos of carbonated mantle peridotite in different ophiolites in the world



(c) - (f) 中国新疆达拉布特蛇绿岩中的蛇纹岩 - 碳酸盐滑石片岩 - 石英菱镁岩分带或晕圈, 石英菱镁岩中见蛇纹岩残余^[48]

图 3-2 全球不同蛇绿岩中碳酸盐化地幔橄榄岩的蚀变带/晕圈

Fig. 3-2 Alteration zones or halos of carbonated mantle peridotite in different ophiolites in the world

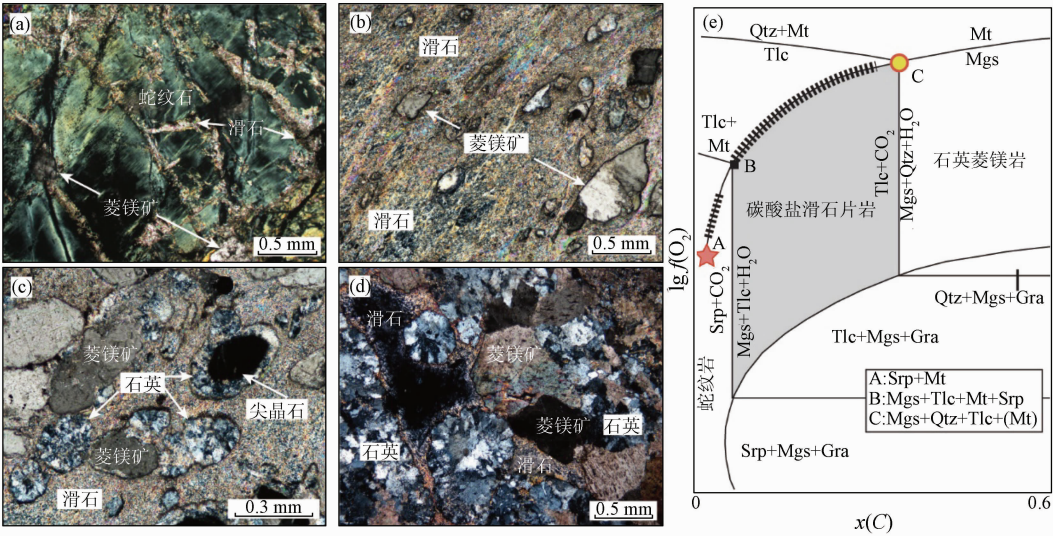


图 4 新疆达拉布特蛇绿岩中蛇纹岩碳酸盐化过程的显微照片及相图关系

Fig. 4 Photomicrographs and phase diagram of the carbonation process of serpentinites in the Darbut ophiolite, Xinjiang

中所有的 Mg^{2+} 转变为碳酸盐矿物, 则可封存 CO_2 7×10^4 Gt^[31]。世界上还有多处和阿曼 Semail 蛇绿岩体积相当的蛇绿岩块体, 如地中海亚得里亚海东海岸出露多个 $100\text{ km} \times 40\text{ km}$ 规模的蛇绿岩块体, 但目前还没有对其封存 CO_2 潜力的评估报道。

3 提高基性 - 超基性岩碳酸盐化反应速率

自然条件下基性 - 超基性岩碳酸盐化反应对地球数百万年时间尺度上的大气 CO₂ 调控起到了重要作用^[32]。如果考虑将基性 - 超基性岩碳酸盐化反应作为碳捕获与封存工程的有效方法,应在充分利用基性 - 超基性岩自身优势的前提下,人为提高矿物碳酸盐化反应速率。实验研究表明,基性 - 超基性岩碳酸盐化反应速率与温度、压力、pH 值、流体流动速率、流体成分以及矿物的接触表面积等因素密切相关^[13,17,31]。

不同矿物如橄榄石、斜长石以及玄武质玻璃和玄武岩的溶解速率在一定温度范围内随温度升高而升高(图 5(a))^[17]。不同温压条件下的橄榄石碳酸盐化反应速率曲线表明,在 185 °C、CO₂ 分压为 3 × 10⁷ Pa 时,橄榄石碳酸盐化速率最佳,比自然条件下(地表 25 °C、10⁵ Pa 大气压)橄榄石碳酸盐化速率快 10⁶ 倍(图 5b)^[31]。

橄榄石、辉石、斜长石和火山玻璃的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 溶解实验显示基性 - 超基性岩矿物溶解速率受流体 pH 值影响(图 5(c))^[13,54-57]。橄榄石和辉石的溶解速率随 pH 值升高而不断降低,但斜长石和火山玻璃的溶解速率在中性 pH 值时最低,且随着 pH 值升高而升高。根据多数矿物的溶解速率在

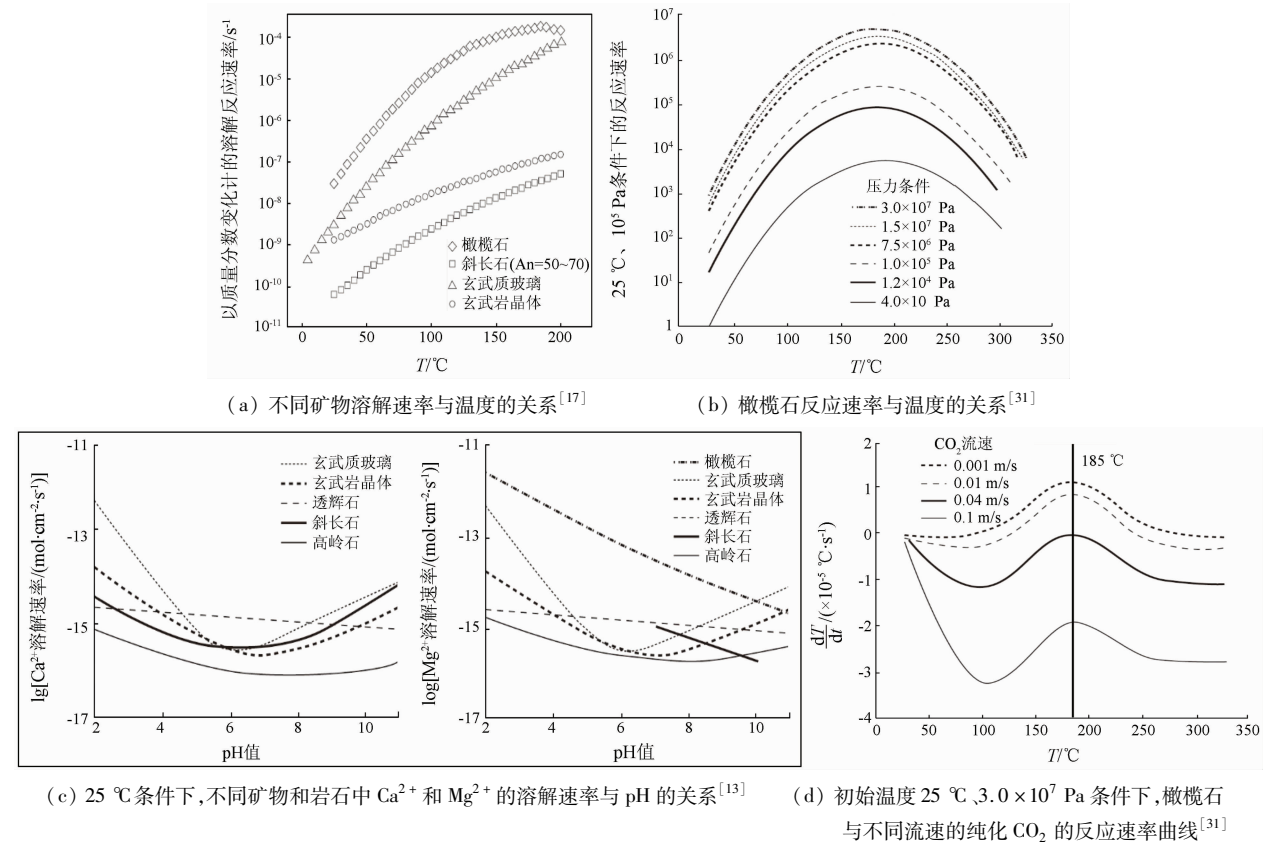


图 5 基性 - 超基性岩矿物碳酸盐化反应速率与温度、压力、pH 以及流体流速的关系
Fig. 5 Diagrams showing carbonation rate of minerals in mafic - ultramafic rock with the change of temperature, pressure, pH and flow rate of fluid

近中性 pH 条件下表现最低的特征,提出了两步骤非原位基性 - 超基性岩碳酸盐化反应固碳的方案,即硅酸盐矿物先在强酸性溶液中溶解,然后在碱性条件下沉淀出碳酸盐矿物。橄榄石在酸性条件下的溶解速率最快^[56],因此成为非原位矿物碳酸盐化固碳的最佳选择。

流体流动速率也对碳酸盐化反应速率有直接影响,主要体现在两方面: ①橄榄岩碳酸盐化反应释放热量,可通过调节流体注入速度使体系温度保持恒定,以确保高的反应速率^[31]。模拟实验表明,在 25 °C、3 × 10⁷ Pa 条件下,纯液态 CO₂ 以 0.04 m/s 的流速注入,可使体系保持最佳反应温度(185 °C)(图 5

(d))。②流体流速决定着单位时间内 CO_2 的供应量,如果流速过慢不能提供足量的 CO_2 ,也会影响碳酸盐化反应速率。

矿物碳酸盐化过程伴随着体积增大,例如橄榄岩碳酸盐化形成石英菱镁岩的反应导致岩石体积增加 44%,岩石孔隙度和渗透性大幅降低,不利于碳酸盐化反应的持续进行^[58-63]。大量石英菱镁岩的存在说明自然界中橄榄岩碳酸盐化反应是能够自发进行的,可能与反应热膨胀和体积增加导致局部应力差产生裂隙从而提高了岩石渗透性并增加了新的反应表面积有关^[45-46]。因此,在基性-超基性岩固碳项目中使用钻探或水压致裂等方法创造裂隙,增加流体运移通道和反应表面积的同时,也为碳酸盐矿物结晶提供了空间^[31]。另外,改变 CO_2 注入的形态,例如先将 CO_2 溶解在水中,以含 CO_2 水溶液的形式注入体系,也是提高矿物碳酸盐化速率的一种方式^[13]。

4 基性-超基性岩碳酸盐化固碳应用

4.1 基性-超基性岩非原位固碳

针对远离地质封存点的 CO_2 密集排放区,基性-超基性岩非原位固碳被认为是碳捕获与封存的一种可行方法。基性-超基性岩经开采、运输和粉碎后,在反应釜中与收集的 CO_2 反应生成碳酸盐矿物达到固碳的效果^[64]。通过控制反应温度、使用催化剂、降低反应物粒度等措施,可以实现高效率固碳^[65]。然而,成本高、规模小的缺点使其难以广泛推广和应用。目前,基性-超基性岩非原位固碳工程主要应用在基性-超基性岩相关的矿山,例如南非金伯利岩型金刚石矿和西澳大利亚的露天镍矿利用采矿或工业尾矿做碳汇^[66-68]。采矿过程中产生的尾矿或矿渣粒度足够小,降低了粉碎碾磨基性-超基性岩(固体反应物)的成本,也提高了其与 CO_2 的反应速率。此外,这些尾矿往往位于 CO_2 排放源附近,源汇匹配度高,大大降低了运输成本。超基性岩矿山中尾矿的自然风化作用被称为被动矿物碳酸盐化固碳效应^[69-72],该过程直接从大气中圈闭 CO_2 的同时也实现了矿山废弃物再利用。

4.2 基性-超基性岩原位固碳

基性-超基性岩原位固碳是指将 CO_2 直接注入地球浅表层的玄武岩或地幔橄榄岩中,二者发生

反应,消耗 CO_2 并将其固定在碳酸盐矿物中的方法。该方法利用地下热能加速碳酸盐化反应速率,也避免了大规模开采、运输和处理固体反应物的步骤和成本,被认为是一种经济、安全且长久的碳捕获与封存方式^[13,31]。目前,国际上原位固碳研究主要集中在实验室反应速率、 CO_2 -水-岩石反应的自然模拟和地球化学建模等内容,仅有少数国家开展了或计划开展玄武岩和超基性岩固碳的先导试验项目。CarbFix 项目是建立在冰岛西南部 Hellisheiði 地热发电厂附近的玄武岩原位固碳先导试验(图 6(a))。第一阶段试验将地热发电厂产生的 230 t 的 CO_2 和 CO_2 - H_2S 气体混合物与 H_2O 混合,注入到地下 500 m 深的玄武岩中(20~50℃)。监测显示 95% 的注入气体在 2 a 内完全转变为碳酸盐矿物^[73-74]。第二阶段试验将含 CO_2 的水溶液注入 800 m 深的玄武岩层中(250℃),并逐渐增加 CO_2 含量。监测显示 50% 的 CO_2 在注入后几个月内转变为碳酸盐矿物^[75-76]。由于新注入的含 CO_2 水溶液中的碳酸盐矿物不饱和,因此在注水井附近未发生碳酸盐矿物结晶和沉淀;随着含 CO_2 水溶液向远处运移, CO_2 与周围岩石反应导致水溶液 pH 值升高至适合碳酸盐矿物结晶的范围,在远离注水井的位置沉淀出碳酸盐矿物^[77]。2013 年,美国华盛顿州瓦卢拉附近的哥伦比亚河溢流玄武岩原位固碳先导试验(简称 Wallula 项目)将约 1 000 t 的 CO_2 处理成液态或超临界状态,注入 800~900 m 深的两个玄武岩层之间(图 6(b))。 CO_2 以自由相的形式被圈闭在玄武岩盖层之下,大部分在 2 a 内转变为铁白云石^[78-79]。监测显示储层没有发生实质性的 CO_2 泄露。不同封存机制在 CO_2 地质封存过程中有着不同的作用时间。玄武岩原位固碳项目中发挥作用的主要是溶解封存和矿物封存机制,且在较短时间内可达到矿物封存效果,增加了封存安全性(图 6(c))^[80]。然而,传统的、利用构造/地层封存的沉积盆地封存项目,要达到矿物封存是个极其缓慢的过程,可能需要数千年(图 6(d))^[7]。

阿曼 Semail 蛇绿岩为超基性岩原位固碳的研究和现场试验提供了天然实验室。自然条件下 Semail 蛇绿岩中超基性岩碳酸盐化速度惊人,估计每年封存 $10^4 \sim 10^5$ t 大气 CO_2 ; 通过钻井和水力压裂增加流体通道和反应表面积、提高橄榄岩初始温度并保持最佳反应温度、注入纯化的 CO_2 等方法,可

以进一步将地幔橄榄岩原位碳酸盐化速率提高 10^5 倍^[31],因此,仅阿曼 Semail 蛇绿岩的地幔橄榄岩每年可封存 CO_2 达 1 Gt。由于地温梯度的影响,地球内部地幔橄榄岩的温度较地表高,同时地幔橄榄岩碳酸盐化反应释放大热量,因此将室温条件下的 CO_2 泵入深部地幔橄榄岩中,可产生较

高效率的固碳效应而无需花费较大费用用于体系升温加热^[31]。该项实验研究证实了超基性岩原位固碳是一种经济、安全且长久的碳封存办法,为世界范围内超基性岩原位封存 CO_2 的工业化实施创造了良好的开端。

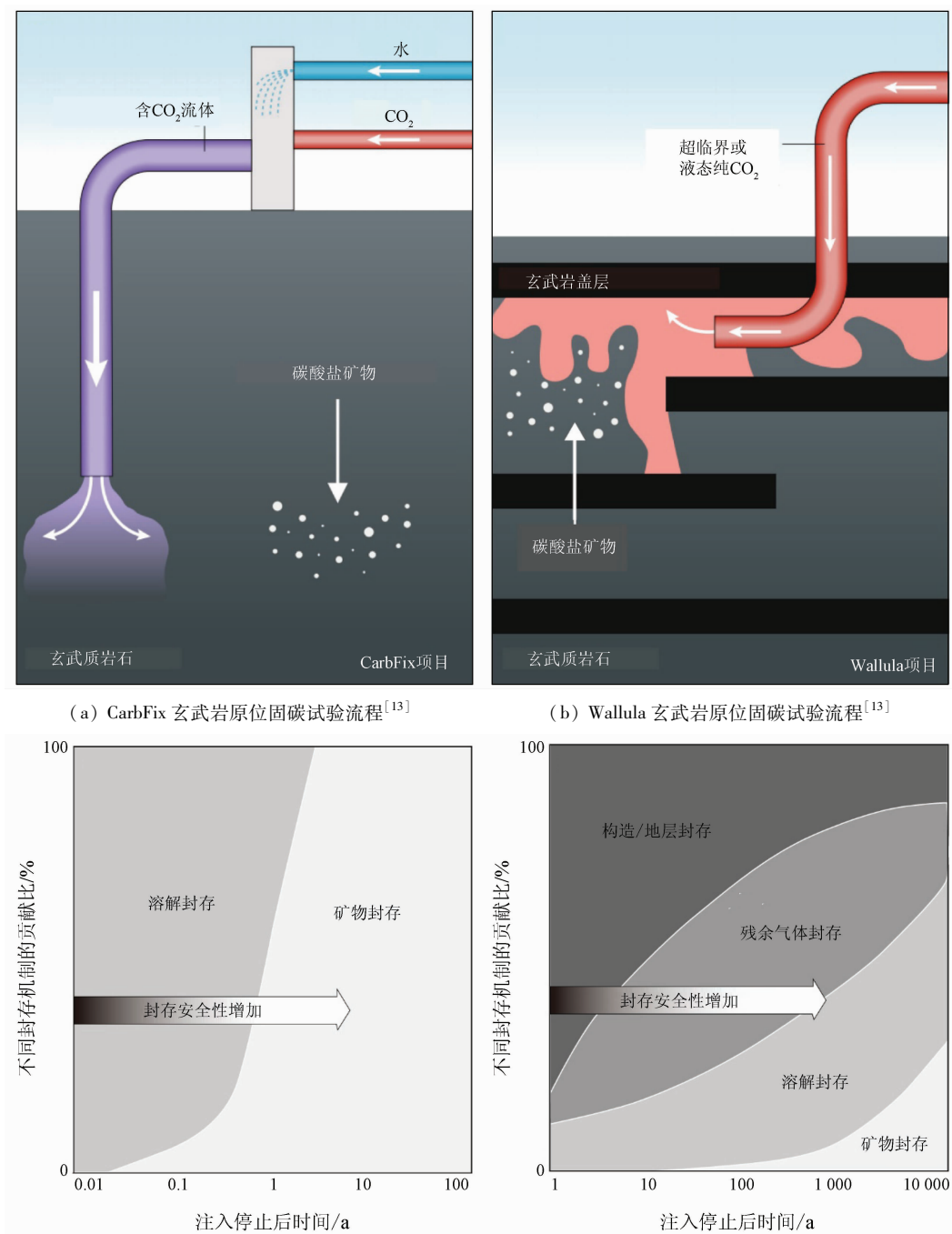


图 6 玄武岩原位固碳试验流程简图以及碳封存机制作用时间及封存安全性

Fig. 6 Wallula projects for in situ carbon sequestration and Time dependency and storage security of different mechanism involved in carbon sequestration

5 基性-超基性岩固碳的前景与挑战

实验研究和现场试验证实了基性-超基性岩固碳的可行性和巨大潜力,但该技术的广泛推广和应用还面临许多挑战。例如,基性-超基性岩石资源较多的区域通常距离 CO_2 密集排放源较远,长距离管道基础设施的建设及其较高的经济成本是制约该技术推广的主要原因。大气碳捕集 (direct air capture, DAC) 技术的研发将有望解决这一难题。由于 CO_2 排入大气会快速扩散,导致各处大气浓度几乎相等,安装在固碳基地附近的 DAC 装置直接从大气中提取 CO_2 ,将其转化为高浓度 CO_2 流再注入矿物固碳系统中^[81-82]。冰岛 CarbFix 项目第二阶段固碳试验已经引入 DAC 技术,并探索其最佳使用条件^[83]。DAC 技术与基性-超基性岩固碳项目的结合使近海的洋底玄武岩-橄榄岩固碳成为可能,极大地扩增了全球可用于固碳的基性-超基性岩储备库。据美国能源部碳安全项目评估,DAC 技术可为美国西海岸 Juan de Fuca 板块的深海玄武岩提供稳定的 CO_2 流,以封存 50 Mt CO_2 ^[84]。也有人提出使用 DAC 技术和可再生风能从大气中提取 CO_2 ,并将其注入封存在南印度洋 Kerguelen 群岛附近的海底玄武岩中^[81]。另外,由于自然环境的复杂多变性以及不同封存地点的地质条件差异,精确控制矿物原位碳酸盐化的最佳反应条件(如温度、反应表面积等)难度极大。基性-超基性岩固碳项目中可能涉及到的打钻、水力压裂以及碳酸盐化过程热膨胀和体积增加产生新的裂隙的情况,是实验室条件下无法完全模拟复制的。针对不同的封存地点,需要大规模现场试验结合精细的实验模拟来评估和优化反应条件及控制参数^[31]。

6 结论

基性-超基性岩碳酸盐化固碳是一种经济、安全且长久的碳捕获与封存方式,有望为实现碳中和目标发挥作用。全球陆地和海洋广泛出露的基性-超基性岩为碳封存提供了巨大的储备空间。目前基性-超基性岩固碳技术的研究程度还相对较低,各国均在努力开展相关现场试验和研究以获取成

功经验,促进该技术的推广和应用。我国境内基性-超基性岩资源丰富,具备利用基性-超基性岩固碳的巨大潜力。加强我国各地区基性-超基性岩的空间展布、储量、地质条件等地质调查以及基性-超基性岩碳酸盐化地球化学动力学机制的基础性研究,探索并确定实施碳封存的有利地区和技术,不仅能更好地掌握我国基性-超基性岩的固碳潜力,也将有助于推进我国基性-超基性岩固碳项目的部署和实施,为落实碳中和国家战略提供科技支撑。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate change: synthesis report [M]//Core Writing Team, Pachauri R K, Meyer L A. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2018 [J]. Bull Am Meteor Soc, 2019, 100(9): S1-S306.
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change. Report of the conference of the Parties on its twenty-first session [R]. Paris: UNFCCC, 2016.
- [4] Intergovernmental panel on climate change. Global Warming of 1.5 °C [R]. IPCC, 2018.
- [5] International Energy Agency. World energy outlook 2017 [R]. IEA, 2017.
- [6] Mani D, Charan S N, Kumar B. Assessment of carbon dioxide sequestration potential of ultramafic rocks in the greenstone belts of Southern India [J]. Curr Sci, 2008, 94(1): 53-60.
- [7] Metz B, Davidson O, de Coninck H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 195-276.
- [8] Suekane T, Nobuso T, Hirai S, et al. Geological storage of carbon dioxide by residual gas and solubility trapping [J]. Int J Greenh Gas Control, 2008, 2(1): 58-64.
- [9] Gentzis T. Subsurface sequestration of carbon dioxide—An overview from an Alberta (Canada) perspective [J]. Int J Coal Geol, 2000, 43(1-4): 287-305.
- [10] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO_2 储存优先区域选择 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 963-968.
- [11] Li X C, Liu Y F, Bai B, et al. Ranking and screening of CO_2 saline aquifer storage zones in China [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2006, 25(5): 963-968.
- [12] 张炜, 李义连, 郑艳, 等. 二氧化碳地质封存中的储存容量评估: 问题和研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1061-1069.

- Zhang W, Li Y L, Zheng Y, et al. CO₂ storage capacity estimation in geological sequestration: Issues and research progress [J]. *Adv Earth Sci*, 2008, 23 (10): 1061 – 1069.
- [12] Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution [J]. *Energy Convers Manage*, 2003, 44 (20): 3151 – 3175.
- [13] Snæbjörnsdóttir S Ó, Sigfússon B, Marieni C, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation [J]. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1 (2): 90 – 102.
- [14] Seifritz W. CO₂ disposal by means of silicates [J]. *Nature*, 1990, 345 (6275): 486.
- [15] Lackner K S, Wendt C H, Butt D P, et al. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals [J]. *Energy*, 1995, 20 (11): 1153 – 1170.
- [16] 盛雪芬, 季峻峰, 陈骏. 中国超基性岩封存 CO₂ 的潜力研究 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31 (3): 447 – 454.
- Sheng X F, Ji J F, Chen J. Assessment of carbon dioxide sequestration potential of ultramafic rocks in China [J]. *Quat Sci*, 2011, 31 (3): 447 – 454.
- [17] Matter J M, Kelemen P B. Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation [J]. *Nat Geosci*, 2009, 2 (12): 837 – 841.
- [18] Kelemen P B, Matter J M, Streit E E, et al. Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, in situ CO₂ capture and storage [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2011, 39: 545 – 576.
- [19] Ellis A J. The solubility of calcite in carbon dioxide solutions [J]. *Am J Sci*, 1959, 257 (5): 354 – 365.
- [20] Ellis A J. The solubility of calcite in sodium chloride solutions at high temperatures [J]. *Am J Sci*, 1963, 261 (3): 259 – 267.
- [21] Saldi G D, Jordan G, Schott J, et al. Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73 (19): 5646 – 5657.
- [22] Johnson N C, Thomas B, Maher K, et al. Olivine dissolution and carbonation under conditions relevant for in situ carbon storage [J]. *Chem Geol*, 2014, 373: 93 – 105.
- [23] Gadikota G, Matter J, Kelemen P, et al. Chemical and morphological changes during olivine carbonation for CO₂ storage in the presence of NaCl and NaHCO₃ [J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2014, 16 (10): 4679 – 4693.
- [24] Turvey C C, Wilson S A, Hamilton J L, et al. Hydrotalcites and hydrated Mg-carbonates as carbon sinks in serpentinite mineral wastes from the Woodsreef chrysotile mine, New South Wales, Australia: controls on carbonate mineralogy and efficiency of CO₂ air capture in mine tailings [J]. *Int J Greenh Gas Control*, 2018, 79: 38 – 60.
- [25] Gras A, Beaudoin G, Molson J, et al. Atmospheric carbon sequestration in ultramafic mining residues and impacts on leachate water chemistry at the Dumont Nickel Project, Quebec, Canada [J]. *Chem Geol*, 2020, 546: 119661.
- [26] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chem Geol*, 1999, 159 (1 – 4): 3 – 30.
- [27] Berner R A, Kothavala Z. Geocarb III: a revised model of atmospheric CO₂ over phanerozoic time [J]. *Am J Sci*, 2001, 301 (2): 182 – 204. doi: 10.2475/ajs.301.2.182.
- [28] Oelkers E H, Gislason S R, Matter J. Mineral carbonation of CO₂ [J]. *Elements*, 2008, 4 (5): 333 – 337.
- [29] Gadikota G. Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization [J]. *Commun Chem*, 2021, 4 (1): 23.
- [30] White A F. Natural weathering rates of silicate minerals [J]. *Treatise Geochem*, 2003, 5: 133 – 168.
- [31] Kelemen P B, Matter J M. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105 (45): 17295 – 17300.
- [32] Macdonald F A, Swanson-Hysell N L, Park Y, et al. Arc-continent collisions in the tropics set Earth's climate state [J]. *Science*, 2019, 364 (6436): 181 – 184.
- [33] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 硅酸盐风化与全球碳循环研究回顾及新进展 [J]. *高校地质学报*, 2012, 18 (2): 215 – 224.
- Wu W H, Zheng H B, Yang J D, et al. Review and advancements of studies on silicate weathering and the global carbon cycle [J]. *Geol J China Univ*, 2012, 18 (2): 215 – 224.
- [34] Kappel E S, Ryan W B F. Volcanic episodicity and a non-steady state rift valley along northeast Pacific spreading centers: evidence from Sea MARC I [J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, 1986, 91 (B14): 13925 – 13940.
- [35] Karson J A. Geologic structure of the uppermost oceanic crust created at fast – to intermediate – rate spreading centers [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2002, 30: 347 – 384.
- [36] Alt J C, Teagle D A H. The uptake of carbon during alteration of ocean crust [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63 (10): 1527 – 1535.
- [37] Coogan L A, Parrish R R, Roberts N M W. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: insight from in situ U-Pb dating [J]. *Geology*, 2016, 44 (2): 147 – 150.
- [38] Wiese F, Fridriksson T, Ármannsson H. CO₂ fixation by calcite in high-temperature geothermal systems in Iceland. ÍSOR report – 2008/003 [R]. Iceland: Iceland Geosurvey, 2008: 1 – 68.
- [39] Snæbjörnsdóttir S Ó, Wiese F, Fridriksson T, et al. CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 4585 – 4600.
- [40] O'Hanley D S. *Serpentinities: recorders of tectonic and petrological history* [M]. New York: Oxford University Press, 1996: 1 –

- 277.
- [41] Kerrick D M, Connolly J A D. Subduction of ophi-carbonates and recycling of CO₂ and H₂O[J]. *Geology*, 1998, 26(4): 375–378.
- [42] Falk E S, Kelemen P B. Geochemistry and petrology of listvenite in the Samail ophiolite, Sultanate of Oman: Complete carbonation of peridotite during ophiolite emplacement[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 160: 70–90.
- [43] Kelemen P B, Manning C E. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112(30): E3997–E4006.
- [44] Beinlich A, Plümper O, Müller I A, et al. Ultramafic rock carbonation: constraints from listvenite core BT1B, Oman drilling project[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, 2020, 125(6): e2019JB019060.
- [45] Menzel M D, Urai J L, de Obeso J C, et al. Brittle deformation of carbonated peridotite: insights from listvenites of the Samail ophiolite (Oman drilling project hole BT1B)[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, 2020, 125(10): e2020JB020199.
- [46] Hansen L D. Geological setting of listwanite, Atlin, BC: implications for carbon dioxide sequestration and lode-gold mineralization[M]. Vancouver: University of British Columbia, 2005.
- [47] Zhang L, Yang J S, Robinson P T, et al. Origin of listwanite in the luobusa ophiolite, Tibet: implications for chromite stability in hydrothermal systems[J]. *Acta Geol Sin (Engl Ed)*, 2015, 89(2): 402–417.
- [48] Qiu T, Zhu Y F. Chromian spinels in highly altered ultramafic rocks from the Sartohay ophiolitic mélange, Xinjiang, NW China[J]. *J Asian Earth Sci*, 2018, 159: 155–184.
- [49] Halls C, Zhao R. Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland[J]. *Miner Depos*, 1995, 30(3–4): 303–313.
- [50] Uçurum A. Listwaenites in Turkey: perspectives on formation and precious metal concentration with reference to occurrences in east-central Anatolia[J]. *Ofioliti*, 2000, 25(1): 15–29.
- [51] Qiu T, Zhu Y F. Listwaenite in the Sartohay ophiolitic mélange (Xinjiang, China): A genetic model based on petrology, U-Pb chronology and trace element geochemistry[J]. *Lithos*, 2018, 302–303: 427–446.
- [52] Nicolas A, Boudier E, Ildefonse B, et al. Accretion of Oman and united Arab emirates ophiolite-discussion of a new structural map[J]. *Mar Geophys Res*, 2000, 21(3–4): 147–180.
- [53] 邱添, 朱永峰. 新疆萨尔托海糜棱岩化石英镁铁岩元素地球化学特征及其对金成矿作用的贡献[J]. *岩石学报*, 2017, 33(12): 3829–3841.
- Qiu T, Zhu Y F. Element geochemical characteristics of mylonitized listwaenite and its contribution to gold mineralization in Sartohay, Xinjiang[J]. *Acta Petrol Sin*, 2017, 33(12): 3829–3841.
- [54] Oelkers E H. An experimental study of forsterite dissolution rates as a function of temperature and aqueous Mg and Si concentrations[J]. *Chem Geol*, 2001, 175(3–4): 485–494.
- [55] Oelkers E H, Gislason S R. The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH=3 and 11[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65(21): 3671–3681.
- [56] Rimstidt J D, Brantley S L, Olsen A A. Systematic review of forsterite dissolution rate data[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 99: 159–178.
- [57] Gudbrandsson S, Wolff–Boenisch D, Gislason S R, et al. Experimental determination of plagioclase dissolution rates as a function of its composition and pH at 22°C[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2014, 139: 154–172.
- [58] Andreani M, Luquot L, Gouze P, et al. Experimental study of carbon sequestration reactions controlled by the percolation of CO₂-rich brine through peridotites[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(4): 1226–1231.
- [59] Kelemen P B, Hirth G. Reaction-driven cracking during retrograde metamorphism: Olivine hydration and carbonation[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 345–348: 81–89.
- [60] Godard M, Luquot L, Andreani M, et al. Incipient hydration of mantle lithosphere at ridges: A reactive-percolation experiment[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 371–372: 92–102.
- [61] Farough A, Moore D E, Lockner D A, et al. Evolution of fracture permeability of ultramafic rocks undergoing serpentinization at hydrothermal conditions: An experimental study[J]. *Geochem, Geophys, Geosyst*, 2016, 17(1): 44–55.
- [62] Oelkers E H, Declercq J, Saldi G D, et al. Olivine dissolution rates: A critical review[J]. *Chem Geol*, 2018, 500: 1–19.
- [63] van Noort R, Wolterbeek T K T, Drury M R, et al. The force of crystallization and fracture propagation during in-situ carbonation of peridotite[J]. *Minerals*, 2017, 7(10): 190.
- [64] Crawshaw J P, Boek E. Reviews in mineralogy and geochemistry[M]//DePaolo D J, Cole D R, Navrotsky A, et al. *Geochemistry of Geologic CO₂ Sequestration*. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America and the Geochemical Society, 2013: 305–360.
- [65] Sanna A, Uibu M, Caramanna G, et al. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂[J]. *Chem Soc Rev*, 2014, 43(23): 8049–8080.
- [66] Wilson S A, Dipple G M, Power I M, et al. Carbon dioxide fixation within mine wastes of ultramafic-hosted ore deposits: examples from the Clinton Creek and Cassiar chrysotile deposits, Cana-

- da[J]. *Econ Geol*, 2009, 104(1): 95–112.
- [67] Harrison A L, Power I M, Dipple G M. Accelerated carbonation of brucite in mine tailings for carbon sequestration[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 47(1): 126–134.
- [68] Mervine E M, Wilson S A, Power I M, et al. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada[J]. *Mineral Petrol*, 2018, 112(2): 755–765.
- [69] Oskierski H C, Dlugogorski B Z, Jacobsen G. Sequestration of atmospheric CO₂ in chrysotile mine tailings of the Woodsreef Asbestos Mine, Australia: quantitative mineralogy, isotopic fingerprinting and carbonation rates[J]. *Chem Geol*, 2013, 358: 156–169.
- [70] Wilson S A, Harrison A L, Dipple G M, et al. Offsetting of CO₂ emissions by air capture in mine tailings at the Mount Keith Nickel Mine, Western Australia: Rates, controls and prospects for carbon neutral mining[J]. *Int J Greenh Gas Control*, 2014, 25: 121–140.
- [71] Gras A, Beaudoin G, Molson J, et al. Isotopic evidence of passive mineral carbonation in mine wastes from the Dumont Nickel Project (Abitibi, Quebec)[J]. *Int J Greenh Gas Control*, 2017, 60: 10–23.
- [72] Turvey C C, Wilson S A, Hamilton J L, et al. Field-based accounting of CO₂ sequestration in ultramafic mine wastes using portable X-ray diffraction[J]. *Am Mineral*, 2017, 102(6): 1302–1310.
- [73] Matter J M, Stute M, Snæbjörnsdóttir S Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312–1314.
- [74] Von Strandmann P A E P, Burton K W, Snæbjörnsdóttir S Ó, et al. Rapid CO₂ mineralisation into calcite at the CarbFix storage site quantified using calcium isotopes[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 1983.
- [75] Gunnarsson I, Aradóttir E S, Oelkers E H, et al. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site[J]. *Int J Greenh Gas Control*, 2018, 79: 117–126.
- [76] Sigfússon B, Arnarson M Þ, Snæbjörnsdóttir S Ó, et al. 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[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 135–145.
- [77] Clark D E, Gunnarsson I, Aradóttir E S, et al. The chemistry and potential reactivity of the CO₂-H₂S charged injected waters at the basaltic CarbFix2 site, Iceland[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 121–128.
- [78] 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.
- [79] McGrail B P, Schaefer H T, Spane F A, et al. Wallula Basalt Pilot demonstration project: post-injection results and conclusions[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 5783–5790.
- [80] Snæbjörnsdóttir S Ó, Oelkers E H, Mesfin K, et al. The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland[J]. *Int J Greenh Gas Control*, 2017, 58: 87–102.
- [81] Goldberg D S, Lackner K S, Han P, et al. Co-location of air capture, subseafloor CO₂ sequestration, and energy production on the Kerguelen plateau[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(13): 7521–7529.
- [82] Goldberg D, Lackner K. Creating negative emissions at remote CO₂ sequestration sites[J]. *Greenh Gases; Sci Technol*, 2015, 5(3): 238–240.
- [83] Gutknecht V, Snæbjörnsdóttir S Ó, Sigfússon B, et al. Creating a carbon dioxide removal solution by combining rapid mineralization of CO₂ with direct air capture[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 129–134.
- [84] Goldberg D, Aston L, Bonneville A, et al. Geological storage of CO₂ in sub-seafloor basalt: the CarbonSAFE pre-feasibility study offshore Washington State and British Columbia[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 158–165.

Progresses on carbon sequestration through carbonation of mafic-ultramafic rocks

QIU Tian^{1,2}, ZENG Lingsen¹, SHEN Tingting¹

(1. Key Laboratory of Deep – Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: Global warming caused by man-made CO₂ emission has posed a great threat to the survival and the de-

velopment of human beings. Carbon capture and storage (CCS) is regarded as a generally accepted technique for reducing CO₂ emission worldwide. As one of geological carbon sinks, carbonation of mafic-ultramafic rocks is an economic, safe and permanent method to capture and store atmospheric CO₂, which has attracted increasing attention from the international community in recent years. The authors have described the carbonation process of mafic-ultramafic rocks under natural conditions, and illustrated the carbon sequestration mechanism and the major factors affecting the rate of carbonation of mafic-ultramafic rocks. Besides, the international research progresses and typical application projects of carbon sequestration through mafic-ultramafic rocks were summarized, and the wide spread of carbonation of mafic-ultramafic rocks around the world was considered to be high potential of carbon sequestration. The promotion and application of this technique has great significance to the reduction of atmospheric CO₂ in the near future.

Keywords: mafic-ultramafic rocks; silicate minerals; carbonation; carbon dioxide; carbon capture and storage
(责任编辑: 沈效群)