

DOI: 10.12401/j.nwg.2022004

中国西北地区超基性岩封存 CO₂ 潜力研究

王国强, 李婷, 陈隽璐, 孙吉明, 朱涛, 卜涛, 黄博涛

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 超基性岩可通过碳酸盐化生成稳定的碳酸盐矿物, 它是一种以地球化学手段有效且永久封存 CO₂ 的矿物。在自然界中矿物封存 CO₂ 可通过风化作用自发发生, 人工干预能进一步提升碳酸盐化反应效率, 促进工业化进程。笔者基于最新 1:100 万西北地质图及数据库, 试图对西北地区分布的超基性岩的封存潜力进行理论评估。结果表明, 西北地区超基性岩封存 CO₂ 量可达 963.23 亿 t, 其中新疆超基性岩 CO₂ 封存量最大, 可达 613.52 亿 t, 占西北地区总封存量的 63.69%。西北地区超基性岩封存 CO₂ 量大致相当于全国 2021 年 CO₂ 排放量的 10 倍, 在完全释放其固碳潜力的情况下, 初步静态估算可封存全国 CO₂ 排放量约 10 年。因此, 西北地区超基性岩封存 CO₂ 潜力巨大。未来, 应针对单个超基性岩体收集已有大比例尺精细基础地质调查数据, 并补充性开展调查及研究工作, 进一步圈定 CO₂ 地质封存的有利靶区, 促进超基性岩封存 CO₂ 的地质解决方案成为未来碳中和目标在西北地区落地实现的最优方案之一。

关键词: 碳捕集与利用; 超基性岩; CO₂ 封存潜力; 中国西北

中图分类号: P588.12+5; X701

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0186-09

Assessment of Carbon Dioxide Sequestration Potential of Ultramafic Rocks in Northwest China

WANG Guoqiang, LI Ting, CHEN Junlu, SUN Jiming, ZHU Tao, BU Tao, HUANG Botao

(Centre for Orogenic Belt Geology of China Geological Survey, Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Carbonatization of ultramafic rocks is potentially important pathway for carbon mineralization occurred in nature, which is an effective and permanent geochemical trapping system for storing the CO₂. The above process can be carried out spontaneously through weathering, and at the same time, manual intervention can further improve the efficiency of carbonatization reaction and promote the process of industrialization. Based on the 1:1 000 000 geological map and database of northwest China, the storage potential of ultrabasic rocks is evaluated theoretically in this paper. After the statistics and calculations on the data of the ultramafic rocks of the northwest China, the results show that the CO₂ sequestration capacity of ultramafic rocks. Totally 96.323 billion tons of carbon sequestration was estimated for northwest China, and the ultramafic rocks in Xinjiang have the greatest amount of CO₂ sequestration, which can reach 61.352 billion tons, accounting for 63.69% of the total storage capacity in northwest China. The amount of CO₂ sequestered by ultramafic rocks in north-

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-07-19; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“甘肃北山泥盆纪高镁安山岩岩石成因及其地球动力学意义”(41703038), 中国地质调查局项目“北山图拉尔根-辉铜山地区区域地质调查”(DD20190812)联合资助。

作者简介: 王国强(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 从事区域地质调查与矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail: gqwangmint@gmail.com。

west China is roughly 10 times as against the total CO₂ countrywide emissions in 2021. Under the condition that the carbon sequestration potential is fully released, based on the national emissions in 2021, a preliminary static estimate suggest that CO₂ can be sequestered for about 10 years. Therefore, ultramafic rocks in northwest China have great potential for CO₂ sequestration. In the future, the fine basic geological survey data of the single typical ultramafic rock should be collected, and supplementary survey and research should be carried out to further delineate favorable targets for CO₂ sequestration. In this region, the geological solution to promote the sequestration of CO₂ in ultramafic rocks has become one of best solutions to achieve the carbon neutrality goals in the future.

Keywords: carbon capture and storage; carbon dioxide sequestration potential; ultramafic rocks; northwest China

人为排放的 CO₂ 是导致全球变暖的最主要因素, 已经成为可持续发展的重要挑战。在全球能源消费中, 化石燃料仍然是现今获取能源的主要手段, 减少 CO₂ 排放量已成为当前迫切需要并引起国际社会关注。中国政府在 2020 年提出力争于 2030 年前 CO₂ 排放达到峰值, 努力争取在 2060 年前实现碳中和目标。如何实现碳中和目标是中国科技工作者不可回避的重要问题, 地质工作者如何在实现碳中和目标中提供有效的地质方案, 助力国家层面的 CO₂ 减排, 是当前研究关注的焦点问题。

碳捕获与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技术被认为是最终实现 CO₂ 零排放的主要途径之一(IEA, 2018; Vishal et al., 2021; 邱添等, 2021); 美国能源部更是建议将利用 CO₂ 考虑其中, 提出系统发展碳捕获、利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS), 倡导“CCS”向“CCUS”的转变。

根据国际能源署最新报告, 碳捕获与封存将可为 2060 年全球所需的累计减排量贡献 13%(IEA, 2019)。因此, 碳捕集与封存技术持续受到了广泛的关注。CO₂ 地质封存方法是控制碳排放量的有效封存机制, 其主要方法可总结为以下 3 类(Matter et al., 2009)(图 1): ①物理封存, 即采用低渗透率岩石(如页岩)覆盖高孔隙度岩石(如砂岩), 将 CO₂ 封存于高孔隙度的岩石中(张舟等, 2012), 例如在废弃的油气田中封存 CO₂(Holloway, 1997; Ciotta et al., 2021)。②溶解封存, 即将 CO₂ 溶解于地下水中, 形成富含 CO₂ 水合物, 例如利用卤水层封存 CO₂(Suekane et al., 2008)。③矿物封存, 即利用 CO₂ 与矿物的化学反应形成稳定的碳酸盐矿物, 实现永久固碳的目的(Oelkers et al., 2008; Snbjrnsdóttir et al., 2020)。方法②和③之间又可先后进行, 例如溶解封存的过程中液态 CO₂ 可与周围岩石中的矿物反应, 促使溶解封存向矿物封存的转变。

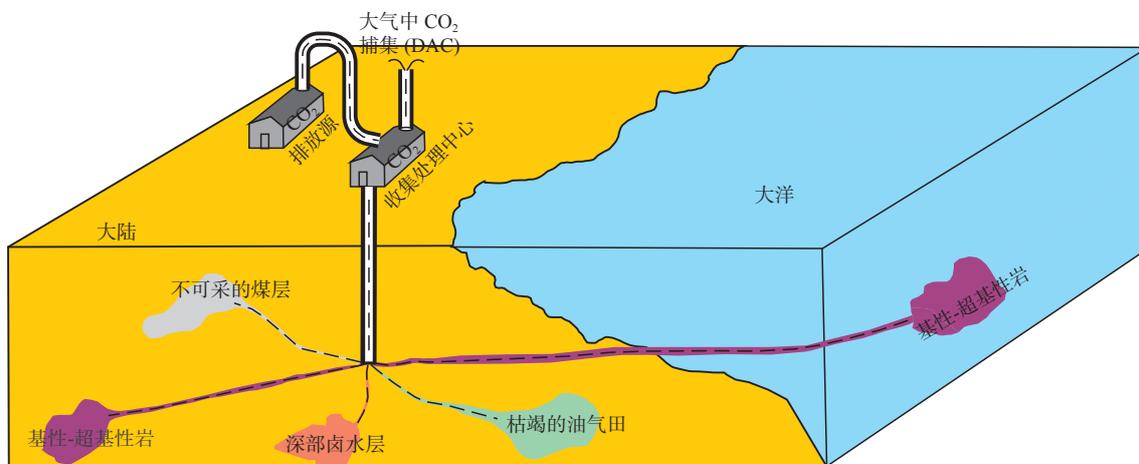


图 1 CO₂ 地质封存方法示意图

Fig. 1 Sketch map showing the approach to carbon dioxide geological sequestration

自然界中超基性岩和基性岩中硅酸盐矿物的风化作用就是大气 CO₂ 的固化过程, 同时也是最为常见

的矿物封存 CO₂ 的实例。由于基性-超基性岩石在风化过程中可与 CO₂ 反应并生成稳定的碳酸盐矿物, 因

此,该过程对于调节全球大气中CO₂含量起着重要作用(吴卫华等,2012),是永久性地固定CO₂重要途径。Seifritz(1990)首次提出可利用钙质硅酸盐矿物的自发放热反应,使得CO₂与硅酸盐矿物通过化学反应结合,形成稳定的碳酸盐矿物,达到永久封存CO₂的目的,之后经过30余年的实验研究表明,矿物封存由于其具有在近地表分布广泛(超基性岩、基性岩中均含有合适的封存矿物)、每年数十亿吨级规模巨大的封存储量(McGrail et al., 2006; Kelemen et al., 2008; Goldberg and Slagle, 2009)、可达到较快的反应速率以及相对较低的工程成本(物理封存和溶解封存需要消耗更多的能量)(Gunnarsson et al., 2018),被认为是CO₂无风险、永久封存且可实现工业化的重要途径(Goff et al., 1998; Kelemen et al., 2008; Matter et al., 2009, 2016; Peter et al., 2011; Zhang et al., 2017; Snbjrnsdóttir., 2020)。目前,矿物封存CO₂的技术正在冰岛Carbfix项目得到商业化应用,自2014年至2022年上半年,已有超过8万t的CO₂注入地下并正在以“不到2年的时间内至少95%的CO₂转变为碳酸盐矿物”的速度进行矿物固碳,为了让更多人了解矿物固碳的有效性,该项目通过网络(<https://www.carbfix.com>)展示了每日注入CO₂质量及矿物封存CO₂的最新进展。

中国西北地区(陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆)具有优越的资源禀赋条件,是重要化石能源、金属矿产产地和煤化工、石油化工等重工业炼化产业基地,与此同时,该区也是CO₂主要排放区之一,在碳中和目标实现过程中承担着CO₂减排的重要任务。前人(盛雪芬等,2011)对中国超基性岩封存CO₂潜力曾进行过有益探索,初步认为中国超基性岩封存CO₂的潜力巨大,总封存量可达 13.02×10^{12} t,其中西北四省区(陕西、甘肃、青海、新疆)总封存量可占比约10%,显示了较高的碳封存潜力。以上研究的基础数据源自1982年出版的中国各省区域地质志,以全国1:50万岩性地质图超基性岩体出露范围估算了其体积,据此为基础探索性的开展了中国超基性岩CO₂封存潜力的分析。然而,在以上分析计算过程中,限于当时的地质调查精度,将蛇绿岩的出露面积笼统地与蛇纹岩面积近似等同,这种方法不甚合理,因为蛇绿岩的组成单元通常包括了超基性岩(蛇纹石化超基性岩或蛇纹岩)、玄武岩、辉长岩及硅质岩等;同时,蛇绿岩和超基性岩分布范围的基础调查资料主要集中于20世纪60~90年代,尚未涵盖国土大调查以来开展的

1:25万、1:5万等大量基础地质调查所识别的超基性岩的资料,例如地质大调查以来(东昆仑和祁连造山带)新识别出的诸多超基性岩或蛇绿混杂岩未考虑在内。以上这些因素均制约了对中国西北地区超基性岩封存CO₂潜力的准确评估。

中国地质调查局西安地质调查中心基于国土大调查以来完成的1:25、1:5万地质图及已有的基础地质调查资料,编制完成了1:100万西北地质图(内部资料,2022年待出版)。该图对西北地区的超基性岩、蛇绿岩等岩石出露范围依据1:25万或1:5万地质填图资料进行了科学编绘,较为准确且客观的反映了出露范围及物质组成,为超基性岩体面积及体积估算提供了更为客观的数据,形成了本次超基性岩封存CO₂潜力评估的基础。综上所述,在当前条件下,有必要对西北地区超基性岩石的CO₂封存潜力进行科学分析和评估。本次在评估超基性岩石的CO₂封存潜力时,力图涵盖整个西北地区所有已识别的超基性岩,在评估过程中考虑蛇纹岩在蛇绿岩岩石组合中的占比以及超基性岩的已有碳酸盐化程度,以期更准确的评估未来可参与CO₂封存的超基性岩的体积及质量,客观认识西北地区超基性岩封存CO₂的潜力。

1 西北地区超基性岩分布概况

超基性岩可分为超基性侵入岩和喷出岩,常见的侵入岩岩石组合主要包括纯橄岩、橄辉岩及辉石岩等,喷出岩则较为少见,包括玻基纯橄岩、玻基橄辉岩、苦橄岩及科马提岩。超基性侵入岩按照常见产出状态主要可分为2类,一类为蛇绿岩组合中的超基性岩,属构造侵位的冷侵入体;另一类为超基性侵入岩,属热侵位的侵入体,常见层状侵入体。此外,还有一种较少见的产出状态,即超基性岩以捕虏体形成产出,这种产状的超基性岩不成规模。现今造山带中蛇绿岩代表已消失的古老洋壳的残余,基本上均以蛇绿构造混杂岩的形式存在,它们大多沿着缝合带或深大断裂带呈线性分布于造山带中,仅西北地区蛇绿混杂岩带就达34条,其中以新疆居多(李智佩等,2020)。蛇绿岩组成通常包括了超基性岩(蛇纹岩)、玄武岩、辉长岩及硅质岩等,根据西北地区野外地质调查经验,一般超基性岩露头面积在整个蛇绿混杂岩带中占比约40%~70%,且蛇绿岩中超基性岩一般为受构造作用所致的无根透镜体。西北地区超基性岩广泛分布

于阿尔泰、准噶尔、天山-北山、昆仑山、祁连山及秦岭造山带之中(图 2), 共计 606 处(陕西 55 处、甘肃 104 处、青海 119 处、新疆多达 328 处), 其中属于蛇绿混杂岩组成部分的超基性岩有 143 处(宁夏暂无区域编图尺度可识别的超基性岩)。从统计结果来看, 西北地区大于 1 km² 大的超基性岩有 522 处, 其中属

于蛇绿混杂岩组成部分的超基性岩有 125 处; 大于 5 km² 的超基性岩体有 188 处, 其中属于蛇绿混杂岩组成部分的超基性岩有 60 处; 大于 10 km² 的超基性岩体有 101 处, 其中属于蛇绿混杂岩组成部分的超基性岩有 37 处; 大于 50 km² 以上的超基性岩有 17 处, 其中属于蛇绿混杂岩组成部分的超基性岩有 7 处。

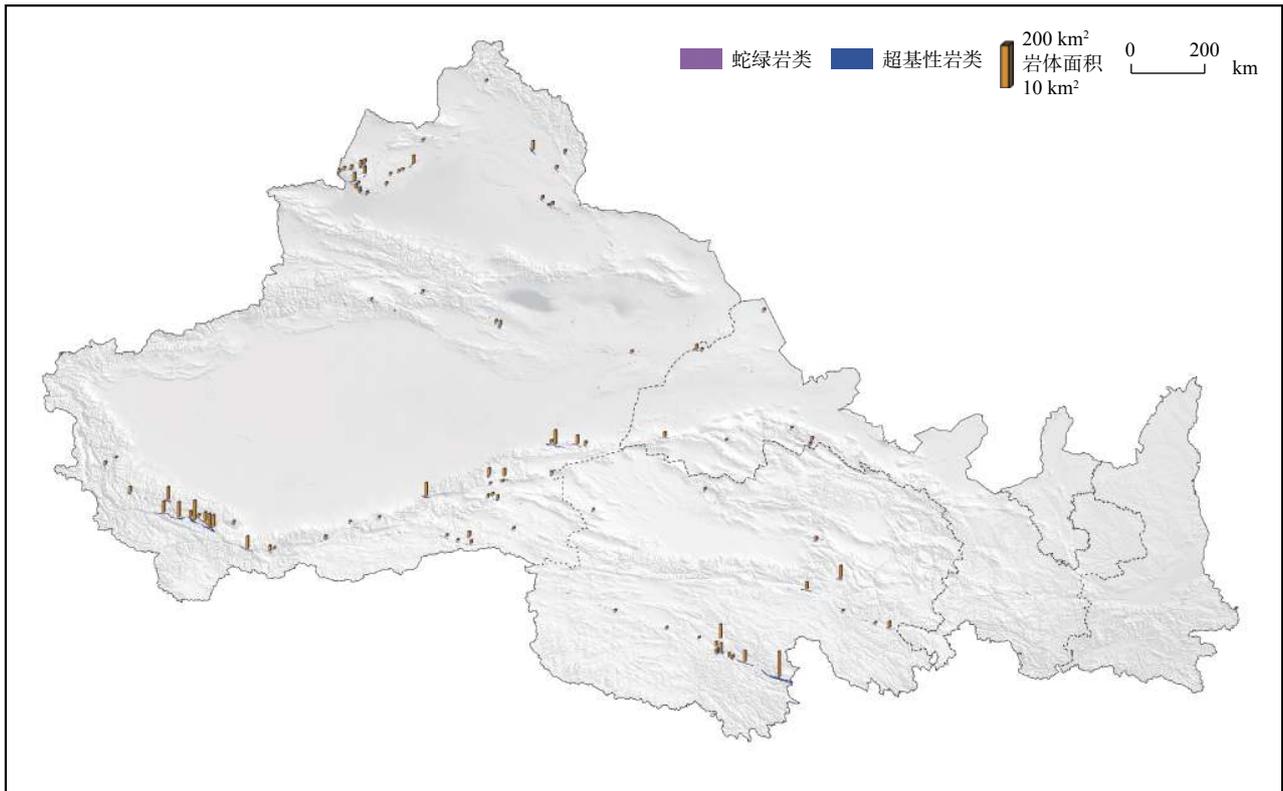


图 2 西北地区超基性岩(含蛇绿岩)分布缩略图(受限于图件比例尺, 仅对部分超基性岩进行图示)

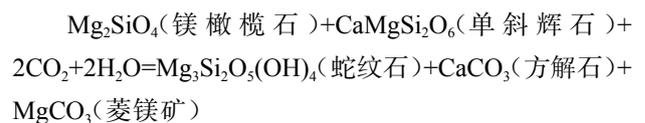
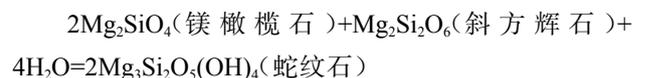
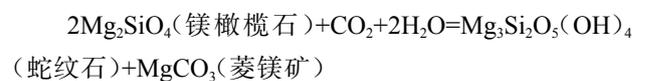
Fig. 2 Sketch map showing the ultramafic rocks in Northwest China (limited by the map scale, only some ultramafic rocks are shown)

2 超基性岩中矿物封存 CO₂ 机理及计算方法

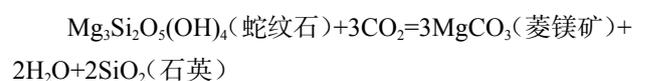
2.1 超基性岩中矿物封存 CO₂ 机理

地幔橄榄岩的主要矿物组成为橄榄石和辉石, 在近地表条件下, 橄榄岩与 H₂O、CO₂ 反应可形成含水硅酸盐(蛇纹石)、铁氧化物(磁铁矿)以及碳酸盐(方解石、菱镁矿和白云石)(Kelemen et al., 2008)。自然界中超基性岩的碳酸盐化过程反映了矿物封存 CO₂ 的机理, 该机理中涉及了以下主要的正向自发放热化学反应, 该反应可先后分为蛇纹石化和碳酸盐化 2 个过程(Kelemen et al., 2008; Matter et al., 2009; Gadikota, 2021; 邱添等, 2021)。

(1) 蛇纹石化



(2) 碳酸盐化



2.2 计算方法

本次为了更为准确的估算西北地区超基性岩的固碳潜力, 依据以下考虑提出了超基性岩封存 CO₂

潜力的计算方法: ①考虑到1:100万西北地质图所示的超基性岩分布范围为不同比例尺(1:25万、1:20万和1:5万)的图件资料所勾绘,并统一编绘至1:100万地质图中,为了在图中能显示出较小且有重要意义的超基性岩,编绘过程对部分超基性岩进行了不同程度的夸大表示,根据编绘经验,本次统一取图元面积的70%代表其实际面积开展封存潜力估算,需要说明的是更为精细的面积估算需要建立在更大比例尺尺度的地质调查基础之上。②考虑到蛇绿岩中橄榄岩的组成,取西北地区蛇绿岩中超基性岩实际统计面积的55%,近似代表橄榄岩的出露面积;1:100万西北地质图少量未分超基性-基性岩,橄榄岩比例按照约50%进行估算。③考虑到现今西北地区超基性岩一般均遭受了一定程度的碳酸盐化,本次取经验值约10%代表其碳酸盐化程度,剩余部分视为未发生碳酸盐化的橄榄岩,未来可参与碳酸盐化反应。④实验研究表明,大约1吨MgO可以封存大约1吨的CO₂,橄榄岩中MgO含量一般为42%~50%;蛇纹岩中MgO含量略低于橄榄岩,一般为32%~36%(Goff et al., 1998; Mani et al., 2008)。本次计算时,橄榄岩中MgO含量取其平均

值为46%,蛇纹岩中MgO含量取其平均值为34%。

基于以上考虑,本次在前人(Goff et al., 1998; Mani et al., 2008; 盛雪芬等, 2011)总结公式的基础上进行了细化,即在参与本次评估的超基性岩面积取值时,考虑了所采用的基础图件与实际面积之间的比例、蛇绿岩中橄榄岩的比例以及碳酸盐化程度,深度取值参考前人(盛雪芬等, 2011)总结的超基性岩深度估算标准,由此建立了西北地区超基性岩封存CO₂潜力计算公式如下:

$$T=1 \times p \times 1/3 \times a \times t \times d \times (1-\Phi)$$

其中, T —可封存CO₂量

p —MgO质量分数

a —参与本次评估的超基性岩出露面积

t —为超基性岩深度的估算值

d —为超基性岩密度,橄榄岩为3.3 g/ml³,蛇纹岩为2.5 g/ml³

Φ —超基性岩的孔隙率,本文取值95%

根据上述公式估算的方法,对中国西北地质图(1:100万)中所表达的超基性岩的CO₂封存潜力进行了详细计算,西北各省(区)的碳封存量及可封存时间等计算结果见表1和图3。

表1 西北各省(区)超基性岩面积与封存CO₂量统计表

Tab. 1 Distribution area and CO₂ storage capacity of ultramafic rocks in the provinces of Northwest China

地区	面积(km ²)	各省碳封存量(10 ⁸ t)	西北地区封存总量(10 ⁸ t)	2019年CO ₂ 排放量(10 ⁸ t)	可封存时间(年)	百分比(%)
陕西	58.01	8.73	963.23	2.96	2.95	0.91%
甘肃	213.92	61.33		1.64	37.29	6.37%
青海	519.91	279.65		0.52	540.36	29.03%
新疆	1476.87	613.52		4.55	134.76	63.69%

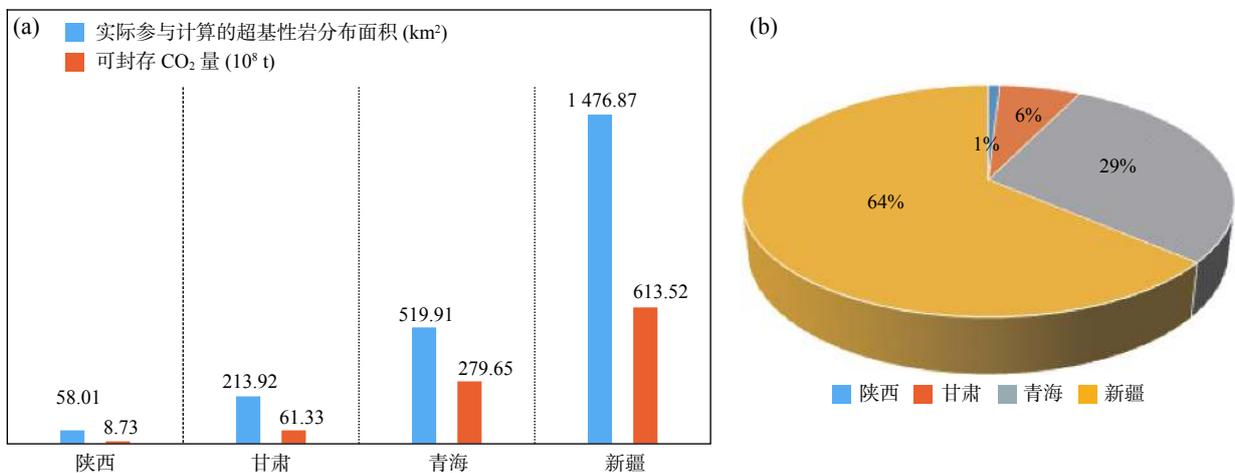


图3 西北地区超基性岩分布面积、封存CO₂量(a)及各省(区)封存量占比图(b)

Fig. 3 (a) Distribution area and (b) CO₂ storage capacity of ultramafic rocks in the provinces of Northwest China

3 西北地区超基性岩封存CO₂潜力初步评价

2018年,中国政府发布了中国气候变化第三次国家信息通报,通报统计结果显示,2010年全国CO₂排放总量为76.78亿t(中华人民共和国,2018);最新国际能源署统计数据表明,2019年中国CO₂排放总量为99.19亿t,且历年数据表明其仍然呈现增长趋势(IEA,2019);中国碳中和目标下CO₂排放路径相关研究表明,中国2027年左右CO₂排放量将达峰,CO₂排放峰值为106亿t(蔡博峰等,2021),从当前和远期来看,CO₂年度排放量仍在百亿吨规模,减排形势依然严峻。中国西北地区广泛分布的超基性岩是矿物封存CO₂的物质基础。本次估算结果表明,西北地区超基性岩可封存CO₂量达963.23亿t,绝对量相当巨大,其中尤以新疆潜力最大,可封存CO₂量为613.52亿t,不仅在西北各区中居首,且其规模达到西北地区总封存量的63.69%(表1)(图3a、图3b)。西北地区超基性岩封存CO₂量大致相当于2010年全国CO₂排放量的12倍(静态估算,大致相当于12年)、大致相当于2019年全国CO₂排放量的10倍(静态估算,大致相当于10年)、大致相当于2027年全国预测CO₂排放量9倍之多(静态估算,大致相当于9年);按照2019年各地区CO₂排放量数据(陕西省2.96亿t、甘肃1.64亿t、青海0.52亿t、新疆4.55亿t;数据来源:中国碳核算数据库)估算,本次评估的陕西超基性岩可封存CO₂排量的时间约为3年,甘肃超基性岩可封存CO₂排量的时间约为37年,青海超基性岩可封存CO₂排量的时间约为540年,新疆超基性岩封存CO₂排量的时间约为135年(表1)。由以上分析可见,西北地区超基性岩具有非常良好的CCS潜力,以2019年全国CO₂排量静态推算,西北地区超基性岩可封存全国CO₂排量的时间约为10年。在西北各省区中,青海具有最优的超基性岩封存CO₂潜力,新疆超基性岩储量和封存CO₂量均居首位,具有较好的封存潜力,甘肃超基性岩封存潜力中等,陕西超基性岩封存CO₂潜力则相对最小。

自然界中超基性岩风化作用所致的碳酸盐化过程较缓慢,在矿物碳酸盐化过程中,反应动力学的优化是至关重要的问题(Pokrovsky et al., 1999; McGrail et

al., 2006)。对超基性岩中橄榄石碳酸盐化实验研究表明,在185℃、 $P_{\text{CO}_2}=3\times 10^7$ Pa时,橄榄石碳酸盐化的反应速率可达到峰值,橄榄岩的反应速率比自然反应加快了约100万倍,以0.04m/s的速率泵入纯液态CO₂(3×10^7 Pa, 25℃)可以使碳酸盐化反应体系始终维持在最佳反应温度即185℃(Barnes et al., 1969; Kelemen et al., 2008; Schaefer et al., 2009)。人工干预以提升超基性岩碳酸盐化反应速率的方法目前已经在矿物封存CO₂中得到较好的应用,例如阿曼Semail蛇绿岩中橄榄岩在自然条件下估计每年封存 $10^4\sim 10^5$ t大气CO₂,通过优化其反应过程后,该橄榄岩每年可封存CO₂大10亿t(Kelemen et al., 2008)。此外,由于碳酸盐化反应属自发放热反应,无需花费较大费用用于体系升温加热(Mani et al., 2008; Gadikota, 2021),因此,在合适的温度、压力条件下,超基性岩固碳的方法被认为是一种经济、安全且长久的碳封存办法,反应速率的提高为超基性岩封存CO₂的工业化实施创造了良好的开端(邱添等,2021)。

西北地区超基性岩分布较多且主要位于造山带中,主要的大中城市(CO₂主要工业排放源)均分布在盆山结合部的山前地带(图2),西北地区超基性岩CO₂封存量巨大(963.23亿t)及估算的封存时间(表1)均显示西北地区具有很好的工业化封存CO₂的前景。基于矿物封存CO₂的机理,西北地区超基性岩封存CO₂可分为2种方案:①异地封存,根据超基性岩与CO₂排放源的地理位置情况,开采超基性岩或利用已有超基性岩相关的矿山尾矿库,超基性岩经粉碎并运输至固碳装置,使其与CO₂反应,这是当前行之有效的CO₂异地封存方法(图1),这种方法已经在南非金伯利岩金刚石矿(Mervine et al., 2018)、加拿大与超基性岩相关石棉矿(Wilson et al., 2009)和西澳大利亚与超基性岩相关的镍矿尾矿(Harrison et al., 2013)中得到了有效应用。然而,异地封存成本高、规模小的特点决定了该方法仅适合于CO₂排放源距离地质封存地点较近的情况。②原地封存,原地封存CO₂的实验方法研究最早应用于阿曼蛇绿岩,每年可封存CO₂量大于10亿t,是低成本、安全且永久固碳的地质封存方式(Kelemen et al., 2008),该方法是原地封存CO₂工业化的成功案例。此外,大气中直接提取CO₂的大气碳捕集(Direct Air Capture, DAC)技术(图1)逐渐成熟并得到了初步应用(Gutknecht et al., 2018),从长远角度分析,该项技术的推广使用将使得利用超基性岩进

行固碳的方法不受空间距离的约束,使得西北地区部分远离排放源的超基性岩具备了利用DAC技术进行原地封存CO₂的可行性。

本次研究显示西北地区超基性岩具有非常大的固碳潜力,但是距离工业化封存CO₂仍然有不小差距。在促进西北地区CCS技术实施过程中,需要依托地球化学、地球物理等手段对单个超基性岩体封存CO₂潜力进行精细评估,从而更为精准地确定其地球化学、矿物组成、蚀变程度及超基性岩深度和体积等参数,在综合经济、社会等因素后进行全面评估,提交CO₂地质封存靶区。因此,未来应针对典型超基性岩体搜集已有大比例尺的精细基础地质调查数据,补充性开展调查及示范研究工作,旨在查明主要超基性岩的三维空间展布、矿物组成及岩石化学等特征,更为精细评估地质及各种外部因素,为矿物封存CO₂的CCS技术在西北地区落地提供基础。

除了超基性岩CO₂矿物封存方法外,基性岩石(玄武岩、辉长岩等)亦具有矿物封存CO₂的潜力,其主要机理为利用玄武质玻璃或基性斜长石(钙长石)与CO₂反应形成高岭石族矿物(Oelkers et al., 2008),从而实现矿物固碳。西北主要造山带中仍存在大量的辉长岩、火山-沉积岩系(含有玄武岩)及少量的斜长岩,该类岩石中通常含有基性斜长石,不同的岩浆岩其斜长石的成分有所差异,辉长岩中为An₅₅₋₆₃,角闪辉长岩中为An₈₅₋₉₅,玄武岩中斜长石斑晶为An₇₀左右(潘兆橹等, 1994)。然而,由于缺乏精细的地质填图工作,无法准确估算辉长岩、玄武岩等岩石的三维空间展布,西北地区基性岩类的固碳潜力尚不明确,有必要对典型基性岩分布区开展进一步的调查研究工作。此外,西北地区具有大型沉积盆地、枯竭的油气田、深部卤水层等地质基础,决定了该区具有包括矿物封存、溶解封存和物理空间封存等全面地质封存CO₂的潜力。随着更为深入的地质填图工作的开展,精细刻画包括基性-超基性岩体、构造封闭空间的三维结构,才能更全面、更客观、更精准地开展西北地区地质封存CO₂潜力评估,提交CO₂地质封存靶区,支撑碳中和目标在西北地区落地,促进区域绿色发展。

4 结论

(1)中国西北地区超基性岩分布面积广,初步评

估其可封存CO₂量达963.23亿t,绝对量相当巨大,大致相当于2019年全国CO₂排放量的10倍,其中尤以新疆超基性岩封存CO₂量居首位,结合CO₂排放量数据估算,西北地区超基性岩显示出良好的封存潜力。

(2)对中国西北地区典型超基性岩开展进一步的精细调查及封存CO₂潜力评估,提交CO₂地质封存靶区,可为促进CCS在西北地区落地提供更为精准的地质解决方案。

参考文献(References):

- 蔡博峰,曹丽斌,雷宇,等.中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J].中国人口·资源与环境,2021,31(1):7-14.
- CAI Bofeng, CAO Libin, LEI Yu, et al. China's Carbon Emission Pathway Under the Carbon Neutrality Target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(1): 7-14.
- 李智佩,吴亮,颜玲丽.中国西北地区蛇绿岩时空分布与构造演化[J].地质通报,2020,39(6):783-817.
- LI Zhipei, WU Liang, YAN Lingli. Spatial and Temporal Distribution of Ophiolites and Regional Tectonic Evolution in Northwest China[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(6): 783-817.
- 潘兆橹,赵爱醒,潘铁虹.结晶学及矿物学[M].北京:地质出版社,1994.
- PAN Zhaolu, ZHAO Aixing, PAN Tiehong. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- 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 Tian, ZENG Lingseng, SHEN Tingting. Progresses on carbon sequestration through carbonation of mafic-ultramafic rocks[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 20-32.
- 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 Xuefeng, JI Junfeng, CHEN Jun. Assessment of Carbon Dioxides Sequestration Potential of Ultramafic Rocks in China[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(3): 447-454.
- 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 Weihua, ZHENG Hongbo, YANG Jiedong, et al. Review and Advancements of Studies on Silicate Weathering and the Global Carbon Cycle[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(2): 215-224.
- 张舟,张宏福.基性、超基性岩:二氧化碳地质封存的新途径[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(1):156-162.
- ZHANG Zhou, ZHANG Hongfu. Carbonation of Mafic-Ultramafic

- Rocks: A New Approach to Carbon Dioxide Geological Sequestration[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(1): 156–162.
- 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[R]. 北京:生态环境部, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Third National Bulletin of the People's Republic of China on Climate Change[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2018.
- Barnes I, O'Neil J R. The Relationship between Fluids in Some Fresh Alpine-Type Ultramafics and Possible Modern Serpentinization, Western United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1969, 80(10): 1947–1960.
- Ciotta M, Peyerl D, Zacharias L G L, et al. CO₂ storage potential of offshore oil and gas fields in Brazil[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 112: 103492.
- Gadikota G. Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization[J]. *Communications Chemistry*, 2021, 4(1): 23.
- Goff F, Lackner K S. Carbon Dioxide Sequestering Using Ultramafic Rocks[J]. *Environmental Geosciences*, 1998, 5(3): 89–102.
- Goldberg D, Slagle A L. A global assessment of deep-sea basalt sites for carbon sequestration[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 3675–3682.
- Gunnarsson I, Aradóttir E, Oelkers EH, et al. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 79: 117–126.
- Gutknecht V, Snbjrnsdóttir S S, 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.
- 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.
- Holloway S. An overview of the underground disposal of carbon dioxide[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(Suppl.): S193–S198.
- IEA. International Energy Agency. World Energy Outlook [R]. 2018.
- IEA. The role of CO₂ storage [R]. 2019.
- Kelemen P B, Matter J. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(45): 17295–17300.
- Mani D, Charan S N, Kumar B. Assessment of carbon dioxide sequestration potential of ultramafic rocks in the greenstone belts of southern India[J]. *Current Science*, 2008, 94(1): 53–60.
- Matter J M, Kelemen P B. Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 837–841.
- Matter JM, Stute M, Snæbjörnsdóttir SÓ, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312–1314.
- 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: 1–13.
- 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]. *Mineralogy and Petrology*, 2018: 1–11.
- Oelkers E H, Gisiason S R, Matter J. Mineral Carbonation of CO₂[J]. *Elements*, 2008, 4(5): 333–337.
- Peter B, Kelemen, Juerg, et al. Rates and Mechanisms of Mineral Carbonation in Peridotite: Natural Processes and Recipes for Enhanced, in situ CO₂ Capture and Storage[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39(1): 547–576.
- Pokrovsky O S, Schott J. Processes at the magnesium-bearing carbonates/solution interface. II. kinetics and mechanism of magnesite dissolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(6): 881–897.
- Schaef H T, McGrail B P. Dissolution of Columbia River Basalt under mildly acidic conditions as a function of temperature: Experimental results relevant to the geological sequestration of carbon dioxide[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(5): 980–987.
- Seifritz W. CO₂ disposal by means of silicates[J]. *Nature*, 1990, 345(6275): 486–486.
- Snbjrnsdóttir S, Sigfússon B, Marieni C, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 90–102.
- Suekane T, Nobuso T, Hirai S, et al. Geological storage of carbon dioxide by residual gas and solubility trapping[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(1): 58–64.
- Vishal V, Verma Y, Chandra D, et al. A systematic capacity assessment and classification of geologic CO₂ storage systems in India[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 111: 103458.
- 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, Canada[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(1): 95–112.
- Zhang S, Depaolo D J. Rates of CO₂ Mineralization in Geological Carbon Storage[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2017, 50(9): 2075–2084.