

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2022078

引用格式: 李鹏春, 江静练, 程锦辉, 赵明辉. 2023. 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, 29(1): 076-084

广东雷州半岛火山岩二氧化碳矿化封存潜力评估

李鹏春^{1,2}, 江静练^{1,3}, 程锦辉^{1,3}, 赵明辉^{1,2,3*}

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 511458;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 火山岩的矿物固碳作用为减少大气中的二氧化碳(CO₂)提供了一种永久性的封存解决方案,是一种经济、安全的碳捕集封存(CCS)方式。中国火山岩分布广泛,但对火山岩固碳潜力的研究还很欠缺。文章选择广东省雷州半岛火山岩为研究区,利用MapGis软件,建立雷州半岛火山岩厚度分布的矢量地理信息数据库,插值得到三维网格化数据体;基于火山岩矿化封存机制和CO₂矿化封存潜力评估方法,对雷州半岛火山岩CO₂理论矿化封存潜力进行了计算。结果表明,雷州半岛火山岩总面积约3940 km²,总体积约257 km³,CO₂理论矿化封存量在19~459亿吨之间。其中以雷南火山岩区潜力最大,理论封存量为13~326亿吨;其次为雷北遂溪县以东、湛江市西部区域的火山岩区,理论封存量为2~56亿吨;东海岛区域火山岩,理论矿化封存量虽然不大(1.5~35亿吨),但因其与周边工业排放源较近,具有较好的源汇匹配条件,具备CCS潜力。研究结果不仅对于优选封存CO₂火山岩储集区带提供重要依据,同时为未来开展区域碳捕集与封存工程或产业提供支撑。

关键词: 火山岩; CO₂矿化; 封存潜力; 评估方法; 雷州半岛

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2023)01-076-09

Assessment of Carbon Dioxide Mineralization Sequestration Potential of Volcanic Rocks in Leizhou Peninsula, Guangdong Province, China

LI Pengchun^{1,2}, JIANG Jinglian^{1,3}, CHENG Jinhui^{1,3}, ZHAO Minghui^{1,2,3*}

1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Mineral carbon sequestration by volcanic rocks, providing a permanent sequestration solution for reducing atmospheric CO₂, is one of an economic and safe way of carbon capture and storage (CCS). Volcanic rocks are widely distributed in China, but research on the carbon sequestration potential of volcanic rocks is still very limited. In this paper, we selected the volcanic rocks of Leizhou Peninsula, Guangdong Province as the study area, and used MapGis software to establish a vector geographic information database of the thickness distribution of volcanic rocks in Leizhou Peninsula, and interpolated to obtain a three-

收稿日期: 2022-09-18; 修回日期: 2022-11-30

基金项目: 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(GML2019ZD0104; GML2019ZD0204); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011298); 国家自然科学基金(91958212; U1901217; 91855101; 41876052); 广东南方碳捕集与封存产业中心玄武岩固碳开放基金联合资助

作者简介: 李鹏春, 副研究员, 从事近海碳捕集利用与封存方面的研究; E-mail: lypengchun@scsio.ac.cn

*通讯作者: 赵明辉, 女, 研究员, 从事海洋地质地球物理方面的研究; E-mail: mhzha@scsio.ac.cn

dimensional gridded data body. The results show that the total area of volcanic rocks in Leizhou Peninsula is approximately 3940 km², with a total volume of 257 km³, and calculated results of the theoretical CO₂ mineralization storage capacity ranges from 1.9 to 45.9 billion tons. Among them, the volcanic rocks in the Leinan area have the largest potential, with the theoretical storage capacity ranging from 1.3 to 32.6 billion tons, followed by volcanic rocks in the area east of Suixi County in Leibei and west of Zhanjiang City, with the capacity from 0.2 to 5.6 billion tons. Although the theoretical storage capacity of volcanic rocks in the Donghai Island area is relatively small (0.15 to 3.5 billion tons), they have a good source-to-sink matching condition due to their proximity to the surrounding industrial emission sources, and so they also have good CCS prospects. The results of this study not only provide an important basis for the screening site of CO₂ mineralization volcanic rocks, but also offer support for future development of regional CCS projects or industries.

Key words: volcanic rocks; mineral carbonation; storage potential, assessment methodology; Leizhou Peninsula

Corresponding author: ZHAO Minghui, Professor; E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn

1 引言

化石燃料的大量使用加剧了温室气体特别是二氧化碳(CO₂)的排放,人为地导致全球气候变暖,对人类和全球动植物的生存居住环境带来了直接而严重的危害。二氧化碳捕集与封存(CCS)被认为是化石能源清洁利用并实现大规模工业碳减排的最有效方法(李琦等, 2022; 李小春等, 2018; 生态环境部环境规划院等, 2021)。CO₂地质封存方法一般情况下包括3种类型:(1)物理封存,即选择低渗透性岩层(如页岩层)覆盖高孔隙度岩层(如砂岩层)中,将CO₂封存在较高孔隙度的岩层中,包括枯竭的油气藏;(2)溶解性封存,即将CO₂溶解于地层水中,如咸水层;(3)矿物性封存,即CO₂与矿物反应形成稳定性的碳酸盐矿物颗粒(Oelkers and Cole, 2008)。在目前所能使用的封存方式中,CO₂矿化封存最为安全、稳定(李晓媛等, 2013)。

CO₂矿化封存最早由Seifritz于1990年提出(Seifritz, 1990)。矿化封存最具潜力的岩石介质是基性或超基性的火山岩(岩浆岩),包括玄武岩、橄榄岩、辉石岩等,其中,以玄武岩分布最广,矿化封存潜力最大(李晓媛等, 2013)。这类岩石除了具有高孔、高渗物性外,还含有大量的二价金属阳离子(如Fe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺),可以与含CO₂的水快速反应形成稳定的碳酸盐矿物沉淀,如方解石(CaCO₃)、菱镁矿(MgCO₃)和菱铁矿(FeCO₃),使得矿物圈闭作用更加有效,从而可以保证长期安全封存CO₂(Snæbjörnsdóttir et al., 2014)。CO₂矿

化封存分为两类,(1)异地封存:将开采的玄武岩和橄榄岩运输到排放源企业所在地与CO₂进行反应固化;(2)原地封存:在富含硅酸盐的地层中进行固化(Oelkers et al., 2008)。地球表面有大量的玄武岩,相应地具有巨大的二氧化碳矿化封存潜力(Matter et al., 2009),如哥伦比亚河玄武岩的总体积为2×10⁵ km³,估计储存能力超过1 Gt CO₂(McGrail et al., 2006);北欧5国的矿化封存潜力为62~333 Gt CO₂(Anthonsen et al., 2013);冰岛近海矿化封存潜力多达700 Gt CO₂(Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016)。Goldberg等人证明了海底玄武岩的巨大容量,如胡安德富卡板块的玄武岩含水层封存潜力超过70 Gt CO₂(Goldberg and Slagle, 2009)。目前玄武岩矿化封存示范项目已有美国的Wallula项目和冰岛CarbFix项目(Matter et al., 2011; McGrail et al., 2011),Wallula项目运行近两年,注入封存约1 000 t CO₂(Anthonsen et al., 2013),CarbFix项目连续运行8年,累计注入超80 000 t CO₂(Gislason et al., 2018),已从最初的试验示范(original CarbFix)发展到工业化规模的固碳(CarbFix2)(Pogge von Strandmann et al., 2019)。

中国玄武岩分布广泛,也具有相当可观的CO₂地质封存潜力,已引起部分学者的关注(李晓媛等, 2013; 邱添等, 2021)。目前已初步筛选出了峨眉山玄武岩、塔里木盆地火山岩、福建沿海火山岩、雷琼火山岩、河北火山岩、山东火山岩以及吉林火山岩等7个潜在CO₂矿化封存潜力区域(CarbFix, 2021)。但总体来看中国尚未深

入开展 CO_2 在火成岩中矿化封存的相关研究, 研究基础很薄弱。广东省雷州半岛分布着大面积的第四纪火山玄武岩(图1), 是开展 CO_2 矿化封存的潜力区域之一, 与粤西 CO_2 排放源形成较好源汇匹配关系, 具备较好的开展先导试验示范条件。因此本文对雷州半岛火山岩 CO_2 矿化封存潜力开展研究, 在分析雷州半岛火山岩分布特征基础上, 利用 MapGis 软件建立了火山岩地理信息系统, 评估火山岩二氧化碳矿化封存潜力, 为未来开展区域碳捕集与矿化封存工程或产业提供支撑。

2 雷州半岛火山岩研究背景

研究区雷州半岛的地形地势平缓, 西北高、东南低, 地貌构造上处于新生代雷琼凹陷的北半

部(徐起浩, 2008), 是华南大陆的最南端, 南海的北部边缘, 大地构造上位于欧亚板块、太平洋板块和印支板块三大板块交汇点的前缘(Tu et al., 1991)。北部以东西向界炮—黄坡断裂为界(图1), 两条大致平行的北西向断裂贯穿整个半岛, 并向南穿过琼州海峡延伸至海南岛东北部。沿断裂火山锥密集分布, 最普遍的是北西向线性排列的火山群, 断裂南西两侧玄武岩台地保存完整, 熔岩流向北西(黄镇国等, 1993), 如雷南西侧的石岭—加山岭—乌石岭—草罗岭—后步岭火山群, 雷南东侧的石林岭—石板岭—石卯岭—大牛岭火山群等; 其次是近东西向雷北的螺岗岭—笔架岭—驾岭—公堂岭火山群。雷州半岛分布有 70 多个火山锥(图1), 主要包括岩溶锥、碎屑锥、混合锥及多重火山锥

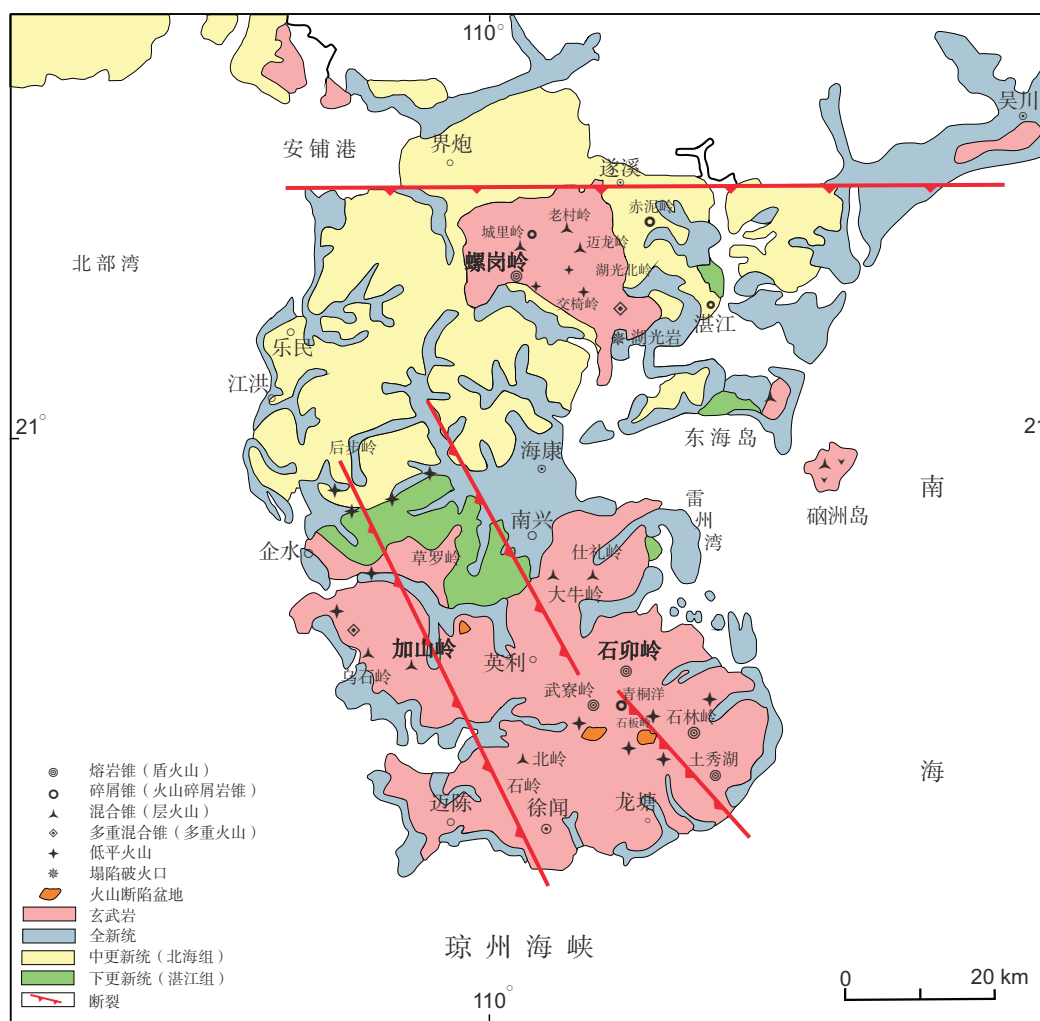


图1 广东雷州半岛火山岩分布地质略图(修改自黄镇国等, 1993)

Fig. 1 The geological sketch showing volcanic rock distributions in Leiqiu Peninsula, Guangdong Province

等类型。根据火山锥的高程分布特征, 雷州半岛有 3 个火山活动中心: (1) 螺岗岭为中心的雷北区; (2) 石卯岭为中心的雷南区; (3) 加山岭为中心的雷西区。半岛南部和北部玄武岩火山高程一般 20~180 m, 雷南高点石卯岭高程为 259.3 m, 也是全区的制高点, 雷北高点螺岗岭高程 233 m, 以火山锥为中心, 地势呈阶梯状向外递降, 台面地形较平坦, 一般坡度小于 5°, 台面之间呈陡坎或缓坡过渡 (黄镇国等, 1993; 姚锦梅等, 2007)。

玄武岩 K-Ar 和 Ar-Ar 年代学研究表明, 该区玄武岩的喷发年龄在 28.4 Ma~<0.1 Ma 都有发生 (Ho et al., 2000), 但大部分在 15 Ma 以后喷发, 属于南海停止扩张之后的区域响应 (朱炳泉等, 1989), 大范围的火山活动主要发生在更新世 (Ho et al., 2000)。玄武岩常见气孔状、杏仁状 (气孔被矿物充填) 构造。玄武岩岩石类型主要以石英拉斑玄武岩和橄榄拉斑玄武岩为主, 部分地区有少量碱性玄武岩出现 (Flower et al., 1992)。玄武岩的微量元素和同位素地球化学具有 OIB 特征, 认为是亏损地幔单元 (CIR MORB) 和富集地幔 II (EM2) 混合的产物 (韩江伟等, 2009), 并经历了相对于碱性玄武岩较大的部分熔融比例 (Ho et al., 2000)。玄武岩的主要造岩矿物为斜长石, 铁镁矿物主要包括辉石和橄榄石, 部分含有火山玻璃。斜长石含量普遍在 30%~60%, 辉石 25%~60%, 橄榄石 3%~7%, 火山玻璃 3%~10%, 其他金属矿物占 3%~5%。橄榄石大多出现在碱性橄榄玄武岩和橄榄拉斑玄武岩中, 其中橄榄玄武岩中橄榄石含量最高 (5%~15%), 拉斑玄武岩中橄榄石较少 (<5%)。橄榄石为半形晶到自形晶体, 常构成斑晶。按照标准矿物计算, 橄榄石中铁橄榄石和镁橄榄石的百分比, 橄榄玄武岩中铁橄榄石占 30.7%, 而拉斑玄武岩为 42.5%, 表明随岩浆的演化, 橄榄石更富铁而贫镁 (黄镇国等, 1993)。

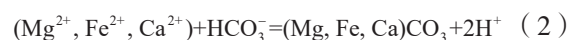
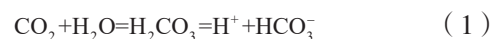
雷州半岛的雨水补给充沛, 地下水径流排泄条件良好, 火山碎屑岩、风化玄武岩、气孔状玄武岩是区域具有供水意义的地下水含水层之一 (孔中恒, 2004)。地下水中的溶解离子除 HCO_3^- 含量大于 100 mg/L 外, 其余离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 含量均较低, 平均含量范围介于 5.16~29.3 mg/L, 地下水的矿化度 (TDS) 也很低 (124.9~356.2 mg/L), 属于极软水。总体上水化

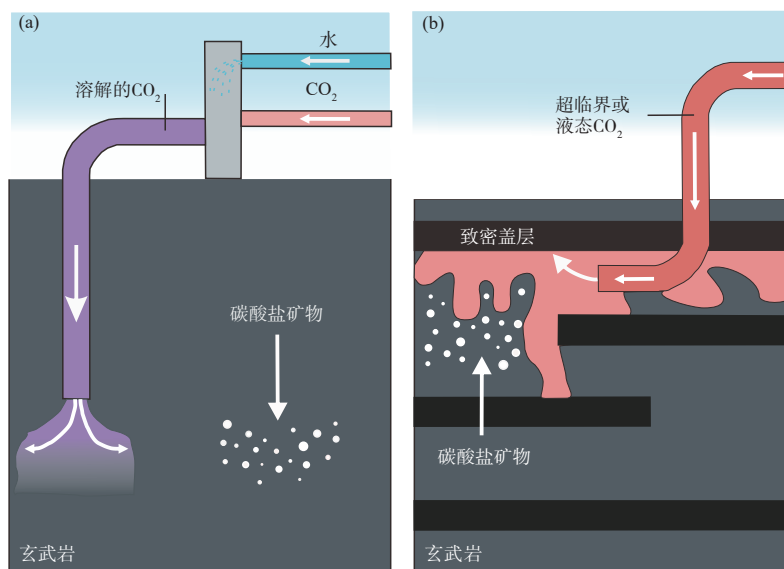
学组分具有雨水与围岩成分的共性, 即矿化度低、主要离子含量低和可溶性 SiO_2 含量高 (姚锦梅等, 2007)。由火山喷发而形成的雷北螺岗岭和雷南石卯岭两个玄武岩台地, 是半岛地下水的主要补给区, 由于冷水流下渗的冷却效应, 研究区新生界浅部地温梯度低于 3°C/100 m, 呈现地热负异常特征 (陈墨香等, 1991), 地下水水温多在 25°C 左右, 只有个别深度大于 600 m 的井揭示深层地下水水温达到 43.6°C (姚锦梅等, 2007)。

3 火山岩矿化封存原理

将 CO_2 注入玄武岩层进行地质封存包括两种注入方式 (图 2) (Gislason and Oelkers, 2014; Snæbjörnsdóttir et al., 2020)。(1) CarbFix 项目是将 CO_2 和水按照 1:25 的比例混合注入 500 m 左右深度的玄武岩层中 (图 2a); 注入含 CO_2 的酸性水的密度比淡水大, 溶解封存立即发生, 并加速了基岩中金属离子的释放, 从而促进了碳酸盐矿物的形成。(2) Wallula 项目是将超临界 CO_2 注入 800~900 m 深度的多孔玄武岩层中 (图 2b), 是一种构造封存, 随着时间的推移, 溶解于水中的 CO_2 会发生反应, 形成碳酸盐矿物; 从构造封存、溶解封存到最后矿化封存, 这个演化过程的时间比较长, 可能需要数千年或更长时间 (Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016; Snæbjörnsdóttir et al., 2014)。雷州半岛火山岩以火山锥为特征, 岩层分布深度较浅, 因此, 只能以第一种 CarbFix 方式进行注入, 实现原位封存。

根据雷州半岛火山岩矿物学特征, 岩性主要为橄榄岩系列, 主要矿物包含长石、橄榄石、辉石、火山玻璃等, 富含高浓度的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等二价阳离子, 是矿化封存 CO_2 的首选岩石类型。当把大量的 CO_2 和水直接注入反应性玄武岩层中, CO_2 会快速溶解在水中, 释放出来 H^+ , 形成 pH 值为 3~5 的酸性溶液, 岩层中镁离子、钙离子和铁离子等与碳酸反应, 生成相应的沉淀性碳酸盐, 从而达到 CO_2 矿化封存的过程 (IEAGHG, 2017; McGrail et al., 2006; Sanna et al., 2014; Snæbjörnsdóttir et al., 2020)。反应方程式可表示为:

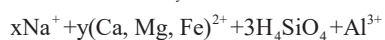
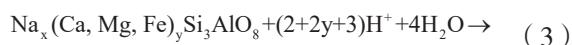




(a) CarbFix方法, CO₂在注入多孔玄武岩层过程中溶解于水,而溶解的CO₂不具有浮力,不会运移泄露至地表,不需要盖层; (b) 构造封存, CO₂以超临界态或液相注入,并封存在盖层之下的多孔玄武岩层中 (修改自Gislason and Oelkers, 2014和Snæbjörnsdóttir等, 2020)

图2 火山岩矿化封存示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing volcanic rock mineralization storage



在该反应过程中,一方面消耗 H⁺,使水溶液 pH 值增加,有利于促进稳定的碳酸盐矿物的沉淀,反应持续到阳离子与反应性岩层中的矿物成份中和后才完全停止;另一方面会促使硅酸盐矿物溶解,使岩层中的富镁、钙、铁相变得不稳定而溶解,提供 Ca²⁺, Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 等二价阳离子,与 CO₂ 结合形成稳定的碳酸盐矿物。产物中碳酸盐岩矿物的种类多样,与反应过程中阳离子的种类、体系 pH 值和地层温度等有关,如在高温条件下 (<300℃) Ca²⁺ 过饱和溶液易析出方解石或霏石;中温 (>65℃) 条件下, Mg²⁺ 过饱和溶液易析出菱铁矿和白云石,而在低温 (<65℃) 条件下则会析出水菱镁矿和球碳镁石等含水碳酸盐岩矿物 (邱添等, 2021)。

4 潜力评估方法

4.1 数据来源

为了较准确评估雷州半岛火山岩 CO₂ 矿化封存潜力,本文通过收集雷州半岛区域水文地质、火山地质、钻孔及相关地质调查研究成果,对研究区火山岩分布厚度进行了统计与分析,建立了地理信息

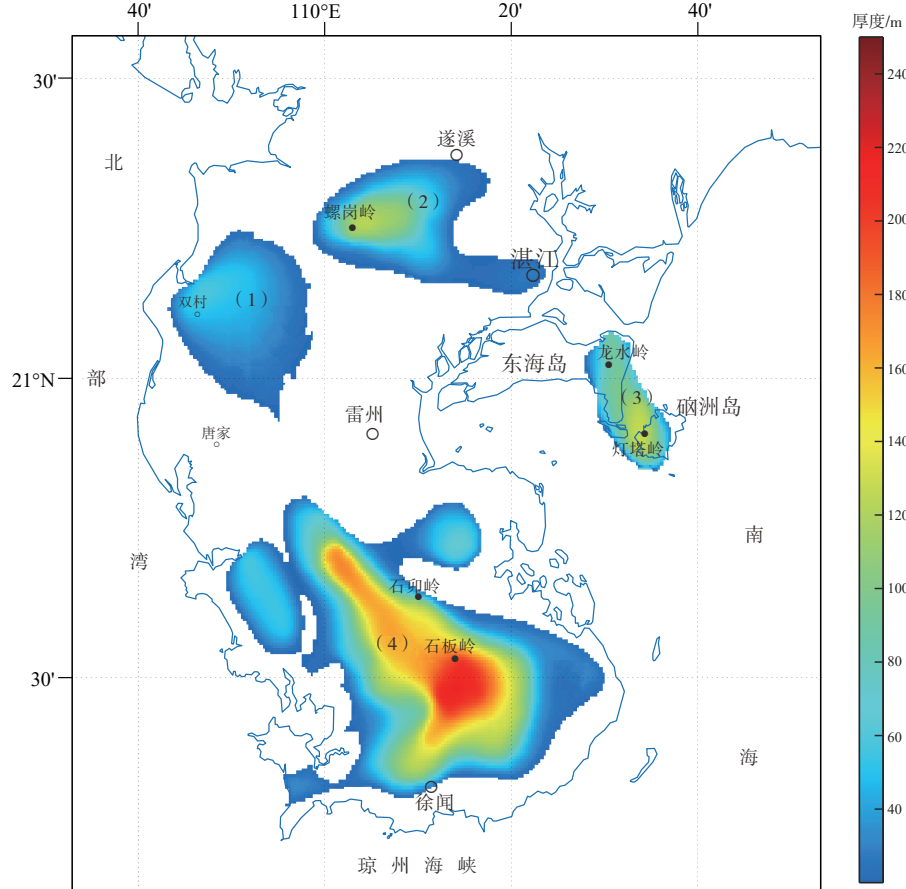
数据库,以便于火山岩体积计算。主要原始数据来自于《雷琼第四纪火山》一书 (黄镇国等, 1993) 及公开发表的相关论文、专著和报告。

4.2 火山岩体积计算方法

通过建立雷州半岛火山岩厚度分布的地理信息数据库,利用 MapGis 软件插值得到三维网格化数据体 (图 3)。网格化后数据点网格边长为 0.005°, 即可得每网格的面积 (S_g), 再统计出有数据点的个数 (n), 则火山岩面积 (S_t) 为所有单个网格点面积的总和 (S_t=S_g×n)。因数据点为插值得到,有效数据点取厚度大于 20 m 的网格。网格点厚度为 H, 因此一个网格点可视为一个长方柱,其体积为单个网格底面积乘以厚度 (V_g=S_g×H); 则火山岩总体积 (V_t) 为所有单个网格点体积的总和 (V_t=ΣV_g)。

4.3 CO₂ 矿化封存量计算方法

目前玄武岩矿化封存 CO₂ 潜力准确评估方法的研究仍然比较欠缺 (Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016)。McGrail 等 (2006) 首次估算了大陆溢流玄武岩等 CO₂ 封存潜力,认为哥伦比亚河面积约 1.64×10⁶ km² 的玄武岩能够封存 100 Gt CO₂。但该方法是以超临界 CO₂ 注入方式封存,需要深井注入和盖层封闭,类似于通常所谓的咸水层构造封存。目前依据矿化封存原理和地质条件特征,关于玄武



图中将雷州半岛火山分为4个区，（1）双村至唐家以北区域；（2）以遂溪的南部和湛江的西部为界的地区；（3）东海岛硇洲岛地区；（4）雷南地区

图3 雷州半岛火山锥累积厚度等值线与分区图

Fig. 3 The cumulative thickness contours and subareas of volcanic rocks in Leizhou Peninsula

岩矿化封存 CO_2 理论潜力计算方法可分为 3 类：

（1）基于玄武岩储层物性的计算方法。Goldberg 等评估了美国俄勒冈州东部 Juan de Fuca 板块海底玄武岩的 CO_2 理论封存潜力。研究中假定在该地区最上层 600 m 的六分之一的区域内含有面积为 7800 km^2 的高渗透性玄武岩层，取平均孔隙度为 10%，则理论上就有 780 km^3 的潜在孔隙体积空间可用于封存 208 Gt CO_2 （液态 CO_2 密度约 1 g/cm^3 ）。如果所有 CO_2 能与玄武岩发生反应并矿化（ CaCO_3 密度约 2.7 g/cm^3 ），则能固化封存约 25 Gt CO_2 （Goldberg et al., 2008）。因此理论封存量计算公式可表示为：

$$M_{\text{CO}_2} = V \times \phi \times d \times e \times 0.56 \times 1000 \quad (4)$$

式中， M_{CO_2} ：理论矿化封存 CO_2 的量， $\times 10^6 \text{ t CO}_2$ ； V ：玄武岩地层体积， km^3 ； ϕ ：玄武岩的孔隙度，%，取 5%（Anthonsen et al., 2013）或 10%

（Gislason et al., 2010; Goldberg et al., 2008）； d ： CaCO_3 密度，为 2.7 g/cm^3 （Goldberg et al., 2008）； e ：碳酸盐岩矿化充填孔隙体积百分比，取值为 10%（Anthonsen et al., 2013; Gislason et al., 2010）或 100%（Goldberg et al., 2008）。

（2）基于自然类比的计算方法。通过测量冰岛东北部的 Krafla、西南部的 Hellisheiði 和 Reykjanes 等三个地区 42 口井约 700 个岩屑样本的 CO_2 含量来估算。结果表明，每平方米表面积约有 28.2~73.1 吨 CO_2 已经自然地固定在三个区域的 1500 m 以浅玄武岩层中（Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016; Snæbjörnsdóttir et al., 2014）。因此可以用这两个地区单位面积的固碳量（28.2~73.1 tCO_2/m^2 ）或单位体积的固碳量（18.8~48.7 kgCO_2/m^3 ）作为参考固碳系数，计算出最小和最大的理论封存潜力。计算公式可表达为：

$$M_{\text{ICo}_2} = V \times e \times 1000 \quad (5)$$

或

$$M_{\text{ICo}_2} = S \times f \times 1000 \quad (6)$$

式中, M_{ICo_2} : 理论矿化封存 CO_2 的量, tCO_2 ; V : 玄武岩地层体积, m^3 ; S : 玄武岩地层分布面积, m^2 ; e : 单位体积玄武岩的固碳量, 取最小值为 $18.8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$, 最大值为 $48.7 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$; f : 单位面积玄武岩的固碳量, 取最小值为 $28.2 \text{ tCO}_2/\text{m}^2$, 最大值为 $73.1 \text{ tCO}_2/\text{m}^2$ 。由于研究区的雷州半岛玄武岩厚度较小, 面积计算误差较大, 本文采用体积公式 (5) 进行计算。

(3) 基于实验的计算方法。通过大量实验分析表明, 矿化封存 1 t CO_2 需要 8.8 t 玄武质玻璃或 5.9 t 镁橄榄石 (Gislason et al., 2010; Marieni et al., 2018; Schaef et al., 2010), 因此假设玄武岩中的镁铁矿物等能 100% 碳酸盐化, 则根据矿化封存化学反应式可计算出所能消耗的 CO_2 的量, 就可得出总的理论封存量 (盛雪芬等, 2011), 计算公式可表达为:

$$M_{\text{ICo}_2} = V \times d \times (1 - \phi) \times f / r \quad (7)$$

式中, M_{ICo_2} : 理论矿化封存 CO_2 的量, $\times 10^6 \text{ t CO}_2$; V : 玄武岩地层体积; d : 玄武岩的密度; ϕ : 玄武岩的孔隙度; f : 玄武岩中橄榄石、玄武质玻璃等镁铁质矿物的含量百分比; r : 矿化系数, 即矿化封存 1 tCO_2 所需要的矿物的量。

5 结果与讨论

5.1 火山岩体积分布

如图 3 所示, 雷州半岛火山岩分布于雷北地区、雷南地区这两个地方, 总体上火山岩的厚度等值线呈不规则的同心圆分布。将雷州半岛火山岩划分为四个区域:

(1) 双村至唐家以北区域, 该区域火山分布面积约 658 km^2 , 厚度 50 m 左右, 以后步岭火山 (高程 71 m) 为中心, 计算的玄武岩层体积约为 22.6 km^3 。

(2) 以遂溪的南部和湛江的西部为界的地区, 该地区火山岩分布面积约 659 km^2 , 火山岩厚度从大于 100 m 逐渐递减为 20 m , 在该区中, 厚度最深的地方为螺岗岭, 累积火山岩厚度为 128.87 m 。火山岩累积厚度呈现的趋势则是西部较厚, 东部较薄, 等厚线呈不规则的同心圆分布, 东西方向展

布, 以螺岗岭火山为中心。计算的玄武岩层体积约为 31.3 km^3 。

(3) 东海岛硇洲岛地区, 该区初露火山岩面积较小, 约 263 km^2 , 火山岩累积厚度的趋势则是南部厚北部薄, 厚度从大于 100 m 逐渐递减为 50 m , 以龙水岭火山为中心, 厚度等值线也是呈不规则的环状分布, 硇洲岛的火山岩累积厚度为 168.47 m 。计算的玄武岩地层体积约为 20 km^3 。

(4) 雷南地区, 该区域的火山岩面积最广, 面积为 2361 km^2 , 火山岩等厚线呈环状分布, 厚度从大于 200 m 逐渐递减为 20 m , 呈中部厚周边薄, 北东方向展布。以石卯岭火山为中心, 厚度最大的地方为徐闻县内的勇士农场, 累积火山岩厚度为 236.1 m (黄镇国等, 1993)。计算的玄武岩层体积约为 182.6 km^3 。

5.2 理论矿化封存量

考虑到湛江雷州半岛火山岩分布以火山锥为主, 玄武岩层埋藏较浅, 要准确评估矿化封存潜力比较困难, 在利用地理信息矢量数据分别计算得出 4 个区域玄武岩分布面积和体积后, 再分别应用储层物性法、自然类比法和实验系数法, 计算相应的矿化封存 CO_2 的理论封存量, 计算结果列于表 1, 然后进行综合对比分析。雷州半岛火山岩的密度为 2.58 g/cm^3 , 孔隙度取值为 8.9% (马中高等, 2020; 张卫华等, 2021), 雷州半岛火山岩中橄榄石等矿物含量统一取值为 45% (黄镇国等, 1993)。

评估结果表明 (表 1), 雷州半岛火山岩总面积约 3940 km^2 , 总体积约 257 km^3 。潜在的理论矿化封存 CO_2 的量在 $1.9 \sim 45.9 \text{ Gt}$ 之间。

根据本文初步评估, 雷南地区火山群连片, 火山规模较大, 包括石卯岭、石板岭等大型火山锥和青桐洋、田洋等大型断陷盆地, 玄武岩地层较厚且连续稳定分布, 分布范围较广, 面积达到 2361 km^2 , 体积 183 km^3 , 理论封存量为 $1.3 \sim 32.6 \text{ GtCO}_2$, 潜力最大, 可为周边工业排放源提供经济、快速、高效的封存量, 建议为区域矿化封存的首选场地。其次为雷北地区的螺岗岭火山群分布区 (图 1), 该区主要包括遂溪岭以北的螺岗岭、城里岭、老村岭火山锥, 赤坎以西的笔架岭、赤泥岭火山锥以及湛江以西的交椅岭火山锥和湖光岩破火山口, 玄武岩层分布也较稳定, 面积约 659 km^2 , 体积 31.3 km^3 ,

表1 雷州半岛火山岩矿化CO₂封存潜力结算结果
Table 1 Calculated results of theoretical CO₂ storage capacity of basalt rocks in Leizhou Peninsula

编号	1	2	3	4	合计
区域	双村—唐家	雷北	东海硇洲岛	雷南	
火山活动中心	后步岭	螺岗岭	龙水岭	石卯岭	
火山岩分布面积 /km ²	658	659	263	2361	3941
火山岩层体积 /km ³	22.6	31.3	20	182.6	257
储层物性法 /×10 ⁶ t	φ10%, 10%充填	473	302	2761	3878
	φ 10%, 100%充填	4733	3024	27609	38783
	φ 5%, 10%充填	237	151	1380	1939
自然类比法/×10 ⁶ t	最小值	588	376	3433	4822
	最大值	1101	974	8893	12492
实验系数法/×10 ⁶ t	橄榄石	5605	3581	32698	45931
	玄武质玻璃	3758	2401	21923	30795

潜在的理论矿化封存 CO₂ 的量在 0.2~5.6 Gt 之间。可为湛江市赤坎区周边的 CO₂ 工业排放源提供潜在的封存潜力。另外东海岛区域玄武岩分布以龙水岭、灯塔岭火山锥为主，初露面积较少，仅为 263 km²，体积为 20 km³，潜在的理论矿化封存 CO₂ 的量在 0.15~3.5 Gt 之间。虽然该区玄武岩初露面积较少，计算的封存量不大，但玄武岩很可能在海水以下也有分布，同时东海岛是湛江市的化工、钢铁等重工业区，大规模 CO₂ 高浓度排放源较集中，构成较好的源汇匹配条件，因此该区域也存在较好的 CO₂ 原位玄武岩矿化封存前景。

同时也注意到，理论封存量变化范围较大，凸显了基于不同计算方法和非常有限数据的不确定性的影响，但也反映出此类地层的巨大潜力。另外玄武岩层的埋藏深度、蚀变程度、渗透性、水源、距离或高地震强度等方面的变化都会导致理论封存量评估结果的不同。由于玄武岩层较致密，孔隙空间有限，孔隙连通性差，岩石活性较小，蚀变和变质作用会影响储层的可注入性和封存能力。但在冰岛 Hellisheiði 场地的强蚀变岩层中，自 2014 年以来一直在注入水和 CO₂ 混合流体，注入性良好，也没有发现泄露等问题 (Snæbjörnsdóttir et al., 2014, 2020)。此外，在美国华盛顿州东部哥伦比亚河玄武岩 Grand Ronde 组岩层中的超临界 CO₂ 注入试验显示，较老的和蚀变的玄武岩中同样具有非常大的封存潜力，固碳系数约为 47 kg CO₂/m³ (Xiong et al., 2018)。因此从这些注入试验效果看，玄武岩层具有较好的可注入性。但其更准确的潜力评估需要进行更广泛而深入的研究，包括储层岩石的岩石物理

性质、矿物组成、水—CO₂—岩反应蚀变作用、反应过程模拟等，以更好地约束玄武岩矿化封存 CO₂ 潜力的评估。

6 结论

(1) 广东省西南部雷州半岛火山岩广泛分布，总面积约 3940 km²，总体积约 257 km³，CO₂ 理论矿化封存潜力在 1.9~45.9 Gt 之间。可为区域工业二氧化碳排放源提供经济、快速、高效的封存量，具有较高的 CCS 潜力。

(2) 雷州半岛最具封存潜力的是雷南火山岩区，主要分布在海康县中南部以及徐闻县全境，面积达到 2361 km²，体积约 183 km³，理论封存量为 1.3~32.6 Gt CO₂，潜力最大，建议为区域矿化封存示范的首选场地区域。其次为雷北遂溪县以东、湛江市西部区域的火山岩区，面积约 659 km²，体积 31.3 km³，理论矿化封存量为 0.2~5.6 Gt CO₂。另外东海岛和硇洲岛区域火山岩面积虽然初露较少，理论矿化封存量仅为 0.15~3.5 Gt CO₂ 之间，但其紧邻东海岛工业排放源，因此也具有一定 CCS 潜力。

(3) 玄武岩层矿化封存 CO₂ 的理论封存量变化范围较大，凸显了基于不同原理的计算方法和有限数据的不确定性影响，但也反映出此类地层巨大的 CO₂ 矿化封存潜力，更准确的潜力评估需要更广泛分析、实验、模拟及工程示范等研究来进一步约束。

致谢：感谢两位匿名评审专家、李琦研究员及编辑老师的宝贵意见，大大提升了论文水平。

参考文献 (References):

陈墨香, 夏斯高, 杨淑贞. 1991. 雷州半岛局部地热异常及其形成

- 机制[J]. 地质科学, 26(4): 369–383.
- 韩江伟, 熊小林, 朱照宇, 等. 2009. 岩浆过程对玄武岩铁氧化状态和氧逸度的影响: 以雷琼地区晚新生代玄武岩为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 34(1): 127–136.
- 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等. 1993. 雷琼第四纪火山[M]. 北京: 科学出版社.
- 孔中恒. 2004. 雷州半岛火山岩的水文地质特征与富水规律[J]. 热带地理, 24(2): 136–139.
- 李琦, 刘桂臻, 李小春, 等. 2022. 多维度视角下CO₂捕集利用与封存技术的代际演变与预设. 工程科学与技术[J], 54(1): 157–166.
- 李小春, 张九天, 李琦, 等. 2018. 中国碳捕集、利用与封存技术路线图(2011版)实施情况评估分析[J]. 科技导报, 36(4): 85–95.
- 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[J]. 现代地质, 27(6): 1477–1483.
- 马中高, 朱立华, 张卫华, 等. 2020. 雷州半岛南部玄武岩岩石物理特征[J]. 石油学报, 41(6): 702–710.
- 邱添, 曾令森, 申婷婷. 2021. 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, 8(4): 20–32.
- 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国21世纪议程管理中心. 2021. 中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究[R]. 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 北京: 生态环境部, 62.
- 盛雪芬, 季峻峰, 陈骏. 2011. 中国超基性岩封存CO₂的潜力研究[J]. 第四纪研究, 31(3): 447–454.
- 徐起浩. 2008. 雷州半岛地裂缝及其构造蠕变成因[J]. 华南地震, 28(1): 52–66.
- 姚锦梅, 周训, 李娟, 等. 2007. 广东雷州半岛玄武岩地下水水文地球化学特征及演化模拟[J]. 地质通报, 26(3): 327–334.
- 张卫华, 马中高, 周枫, 等. 2021. 雷州半岛南部玄武岩岩石物性与激发地震波属性关系研究[J]. 地球物理学进展, 36(2): 0706–0715.
- 朱炳泉, 王慧芬. 1989. 雷琼地区MORB-OIB过渡型地幔源火山作用的Nd-Sr-Pb同位素证据[J]. 地球化学, 3: 193–201.
- Anthonsen K L, Aagaard P, Bergmo P E S, et al. 2013. CO₂ storage potential in the Nordic region [J]. Energy Procedia, 37: 5080–5092.
- CarbFix O. 2021. Pre-feasibility screening study for CO₂ mineral storage potential in China [R]. Baejarhals 1, 110 Reykjavik, Iceland: 1–58.
- Flower M F J, Zhang M, Chen C Y, et al. 1992. Magmatism in the south China basin. 2. post-spreading quaternary basalts from Hainan Island, south China [J]. Chemical Geology, 97: 65–87.
- Gislason S R and Oelkers E H. 2014. Carbon storage in basalt [J]. Science, 344: 373–374.
- Gislason S R, Sigurdardóttir H, Aradóttir E S, et al. 2018. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase [J]. Energy Procedia, 146: 103–114.
- Gislason S R, Wolff-Boenisch D, Stefansson A, et al. 2010. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4: 537–545.
- Goldberg D and Slagle A L. 2009. A global assessment of deep-sea basalt sites for carbon sequestration [J]. Energy Procedia, 1: 3675–3682.
- Goldberg D S, Takahashi T and Slagle A L. 2008. Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105: 9920–9925.
- Ho K S, Chen J C and Juang W S. 2000. Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18: 307–324.
- IEAGHG. 2017. Review of CO₂ Storage in Basalts [R]. Report No. 2017, TR2.
- Marieni C, Prikryl J, Aradóttir E S, et al. 2018. Towards 'green' geothermal energy: Co-mineralization of carbon and sulfur in geothermal reservoirs [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 77: 96–105.
- Matter J M, Broecker W S, Gislason S R, et al. 2011. The CarbFix Pilot Project—storing carbon dioxide in basalt [J]. Energy Procedia, 4: 5579–5585.
- Matter J M, Broecker W S, Stute M, et al. 2009. Permanent carbon dioxide storage into basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland [J]. Energy Procedia, 1: 3641–3646.
- McGrail B P, Schaef H T, Ho A M, et al. 2006. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111: 1–13.
- McGrail B P, Spane F A, Sullivan E C, et al. 2011. The Wallula basalt sequestration pilot project [J]. Energy Procedia, 4: 5653–5660.
- Oelkers E H and Cole D R. 2008. Carbon dioxide sequestration a solution to a global problem [J]. Elements, 4: 305–310.
- Oelkers E H, Gislason S R and Matter J. 2008. Mineral carbonation of CO₂ [J]. Elements, 4: 333–337.
- Pogge von Strandmann P A E, Burton K W, Snaebjörnsdóttir S Ó, et al. 2019. Rapid CO₂ mineralisation into calcite at the CarbFix storage site quantified using calcium isotopes [J]. Nat. Commun, 10: 1983.
- Sanna A, Uibu M, Caramanna G, et al. 2014. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂ [J]. Chem. Soc. Rev., 43: 8049–8080.
- Schaef H T, McGrail B P and Owen A T. 2010. Carbonate mineralization of volcanic province basalts [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4: 249–261.
- Seifritz W. 1990. CO₂ disposal by means of silicates [J]. Nature, 345: 486–486.
- Snaebjörnsdóttir S Ó and Gislason S R. 2016. CO₂ storage potential of basaltic rocks offshore Iceland [J]. Energy Procedia, 86: 371–380.
- Snaebjörnsdóttir S Ó, Sigfússon B, Marieni C, et al. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 1: 90–102.
- Snaebjörnsdóttir S Ó, Wiese F, Fridriksson T, et al. 2014. CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges [J]. Energy Procedia, 63: 4585–4600.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. 1991. Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (South China)—implications for a subcontinental lithosphere dupal source [J]. Geology, 19: 567–569.
- Xiong W, Wells R K, Horner J A, et al. 2018. CO₂ Mineral sequestration in naturally porous basalt [J]. Environmental Science & Technology Letters, 5: 142–147.