海洋碱性矿物增汇技术发展方向研究

郭雪飞[1]，张敏吉[1]，周微[2]，任宏伟[3]，郑力文[3,4]，苏贝[3]，胡玉斌[3]，刘纪化[3]

（1. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028；2. 中海油天津化工研究设计院有限公司 天津 300131；
3. 山东大学 青岛 266237；4. 威海市蓝色经济研究院有限公司 威海 264400）

摘要：工业革命以来，近1/3人为排放的二氧化碳被海洋吸收，海洋负排放潜力巨大。海洋碱化技术被认为是最具有固碳潜力的海洋负排放技术之一。硅酸盐碱性矿物橄榄石风化速率高，在自然界中具有广泛的分布。海水增汇效率受到橄榄石的溶解速率、扩散速率等因素的影响。基于近海橄榄石海上反应平台，利用清洁能源将橄榄石破碎、研磨加速其溶解，再由海流将高碱度海水进行扩散促进毗邻海域对大气二氧化碳吸收的方法具有广阔的应用前景。随着我国近海油气资源的开发，基于海上油气平台发展橄榄石碱化增汇技术，降低海上碱化反应平台基建成本的同时，可捕集油气生产过程中的二氧化碳，随碱化后海水入海，进一步提高碱性矿物增汇技术的碳封存效能。

关键词：碱性矿物；橄榄石；碳捕集；橄榄石海上反应平台

中图分类号：P7 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2023)09－0030－07

Technology Development and Future Directions of Ocean Alkalinity Enhancement

GUO Xuefei[1], ZHANG Minji[1], ZHOU Wei[2], REN Hongwei[3], ZHENG Liwen[3,4], SU Bei[3], HU Yubin[3], LIU Jihua[3]

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. CNOOC Tianjin Chemical Research and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300131, China; 3. Shandong University, Qingdao 266237, China; 4. Institute of Blue Economic Research in Weihai Co., Ltd., Weihai 264400, China)

Abstract: Since the industrial revolution, nearly one-third of anthropogenic carbon dioxide emissions have been absorbed by the ocean which has a huge potential for negative emissions. Ocean alkalinity enhancement is considered to be one of the most potential marine negative emission technologies. Olivine which is widely distributed over the world is one of the silicate alkaline minerals and has a high weathering rate. The efficiency of ocean alkalinity enhancement is affected by the dissolution rate and diffusion rate of olivine. On the offshore olivine reaction platform, the method of grinding olivine to accelerate its dissolution based on clean energy and diffusing high-alkalinity seawater through ocean currents to accelerate the absorption of atmos-

收稿日期：2022-12-19；**修订日期**：2023-08-11

基金项目：中海石油（中国）有限公司北京研究中心项目（CCL2022RCPS0407RSN；CCL2022RCPS0316RSN）；山东省重点研发计划项目（2020ZLYS04）.

作者简介：郭雪飞，高级工程师，博士，研究方向为新能源、CO_2减排技术研究开发

通信作者：刘纪化，教授，博士，研究方向为海洋微生物碳循环

pheric carbon dioxide has broad application prospects. With the exploration of offshore oil and gas resources in China, the combination of olivine offshore reaction platform and offshore oil and gas platform can not only save the construction cost of olivine offshore platform, but also capture the carbon dioxide during the producing process of oil and gas, which will further increase the efficiency of carbon sequestration.

Keywords: Alkaline mineral, Olivine, Carbon capture, Olivine offshore reaction platform

0　引言

工业革命以来，大气中二氧化碳浓度从280 ppm增长至 418 ppm[1]，二氧化碳浓度的人为排放增加导致全球升温[2]。2021 年政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告[3]指出，近年来人类影响导致的全球变暖速度在过去 2000 年里是前所未有的，基于模型对未来全球温度的推算发现，在高二氧化碳排放的场景中 21 世纪末全球平均升温高达 4.4 ℃，即使在低二氧化碳排放的场景中 21 世纪末的全球平均升温也将达 1.4 ℃(图 1)。研究表明全球平均温度每上升 0.5 ℃，极端天气的强度和频率将持续增加。因此，升温以及极端天气频发对人类社会的可持续发展造成不利影响[4-6]。

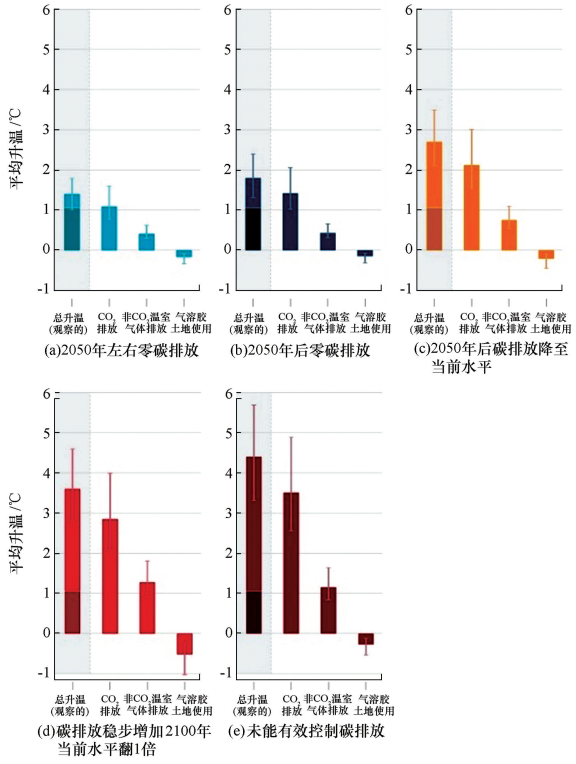

图 1　5 种温室气体排放场景下全球升温温度[3]

Fig. 1　Global surface temperature for five scenarios of greenhouse gas emission[3]

为了控制和减缓二氧化碳等温室气体排放导致的全球气候变化，2015 年多个国家签署了《巴黎协定》，明确指出将全球温度控制在自工业革命以来升温 2 ℃以内，并努力做到将温度控制在 1.5 ℃以内，以降低全球气候变化导致的生态效应[7]。为了控制全球升温及降低生态影响，需要减少二氧化碳的排放量(减排)并增加大气二氧化碳的移除量(增汇)。目前全球能源供给结构中化石能源(石油、天然气、煤)仍占有较高比例[8-9]，仅通过减少二氧化碳的排放无法保证人类社会可持续发展的前提下实现将全球平均升温控制在 1.5℃。而人类活动产生的二氧化碳排放量的增加大大超过了自然界从大气中去除二氧化碳的能力[10]，因此人为将大气中过量的二氧化碳清除是可持续发展的必要条件，研发负排放技术是实现全球平均升温 1.5℃的重要途径之一。海洋作为地球上最大的活跃碳库，占全球面积的 71%，其碳库储量是大气的 50 倍，是陆地的 20 倍[11-12]。海洋系统增汇潜力巨大，是实现碳中和的重要技术路线之一。

1　海洋碳库及储碳机制

海洋系统中碳的存在形式主要包括溶解无机碳、溶解有机碳、颗粒有机碳。海水中大部分碳是以溶解无机碳的形式存在，其次为溶解有机碳和颗粒有机碳(图 2)。海洋中的溶解有机碳又根据可利用性分为易降解溶解有机碳和惰性溶解有机碳[13]，惰性溶解有机碳在海洋中具有较高的比例，占海洋溶解有机碳的 95%。溶解无机碳、溶解有机碳和颗粒有机碳在海洋中的碳库储量分别为 37 400 Gt、662 Gt、20 Gt[13-14]。

海洋中的储碳机制包括：溶解度泵、碳酸盐泵、生物泵和微型生物碳泵[12]。溶解度泵受海－气界面的二氧化碳分压差的影响，大气中二氧化碳分压高于海

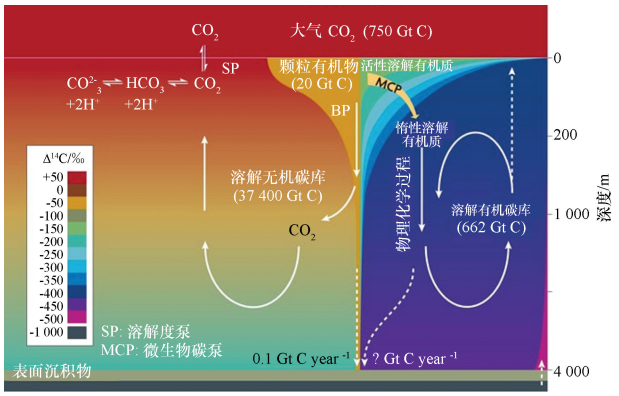

图 2 海洋碳储的主要机制[13]

Fig. 2 The major mechanisms for formation of oceanic carbon reservoirs[13]

洋表面时，二氧化碳由大气进入海洋，该机制在调节全球气候以及海洋碳循环中起到重要的作用。碳酸盐泵是指颗石藻等钙化生物固定海水中的碳酸盐形成钙质外壳，并沉降至海底封存的机制，在该过程中，碳酸盐沉淀会释放出等量的二氧化碳，因此该机制也被称为碳酸盐反泵[15－16]。生物泵是指真核微藻等通过光合作用将二氧化碳转化为有机碳，并在食物网中逐级传递，最终以颗粒有机碳的形态由表层海水向深海沉降的过程。生物泵的通量随着深度的增加逐渐降低，能够沉降至海底的有机碳量仅占表层海水固碳量的 0.1%～1%，大部分有机碳在移出混合层前被微型生物利用转化[17－18]。然而海洋中部分的有机碳没有被矿化为二氧化碳，海洋中的微型生物将易降解溶解有机碳转化为惰性溶解有机碳，从而实现将溶解有机碳长期封存，该机制称为微型生物碳泵[19]。与生物泵不同，微型生物碳泵不受沉降等过程的影响，存在于整个海洋中。惰性有机碳可以在长时间尺度保持稳定，不再参与海洋中的碳循环。

2 海洋增汇途径

工业革命以来海洋吸收了近 1/3 人为排放的二氧化碳[20]，具有巨大的固碳潜力。近年来，国内外学者对海洋增汇进行了探索，提出了海洋施肥（氮、磷、铁）、人工上升流、海洋生态系统恢复、大型海藻养殖、海洋碱化等方法[21－23]。通过向表层海水人为添加或者通过上升流的形式补充营养盐刺激浮游植物的生长繁殖，进而促进光合作用，固定更多的二氧化碳，进而增强生物泵和微型生物碳泵的固碳潜力[24]。Jiao 等[25]提出浮游植物在富营养环境下产生的有机碳活性更高，被细菌利用转化为二氧化碳，因此通过刺激浮游植物生长繁殖进而增强海洋碳汇的方式需要对营养盐的添加量进行合理的评估，以维持固碳量和细菌呼吸消耗之间的平衡，提高固碳效率。大型海藻养殖碳汇则是在大型海藻人工养殖过程中，随着养殖海藻的光合生长，提高海域颗粒有机碳和溶解有机碳通量，同时通过海藻收获从海水中移出生物质碳，用于工业生产，从而实现海洋系统的增汇效果[26－27]。海洋碱化是指在海洋表层添加破碎后的碱性矿物以加速其风化的机制[28]。碱性矿物可以显著提升海水的碱度。近年来由于海洋中二氧化碳大量的吸收导致表层海水的缓冲能力降低，提升碱度可以恢复海水对二氧化碳的缓冲能力[29]。

3 海洋碱化增汇技术

美国国家科学院在 2021 年报告[21]中指出对海洋增汇的手段进行了评估，海洋碱化的环境风险中等且可行性高。海洋－大气界面的二氧化碳的交换是海洋碳循环的重要过程之一，碱性矿物添加对表层海水中二氧化碳的消耗能够增强海洋的汇效应或者降低海洋的源效应。此外，碱性矿物可以缓解海洋酸化导致的生态效应[30]。pH 是海洋生态系统中关键的环境因子，海水 pH 的改变会导致海洋生物的组织渗透压发生改变，对珊瑚等酸碱平衡能力弱的生物造成组织损伤[31]。同时，海洋酸化会导致海水中的碳酸根离子浓度降低，将对海洋中的生物钙化过程产生影响[32]。焦念志[26]在缺氧海区生态修复增汇工程中提出，通过在缺氧酸化海域施加碱性矿物以实现在增汇的同时能够解决环境问题，应用潜力巨大。模型研究表明，在海洋中大范围的施加碱性矿物可以有效地吸收海洋中的二氧化碳，提高海洋的碳汇能力[28,33－34]。

碱性矿物主要包括硅酸盐矿物、碳酸盐矿物。研究表明，硅酸盐矿物相对碳酸盐矿物的增汇潜力更大，每摩尔的硅酸盐矿物（硅灰石、橄榄石和钙长石等）在海洋中溶解至少可以吸收 1.5 摩尔的二氧化碳，而碳酸盐矿物仅能吸收 0.5 摩尔[28]，硅酸盐矿物相对于碳酸盐矿物具有更高的固碳潜力。此外，碱性

硅酸盐矿物溶解能有效提高海水碱度、缓解海水酸化的同时，其溶解释放的溶解硅潜在促进硅藻生长[35]，进而增强生物泵，进一步提高增汇潜力，因此硅酸盐矿物相对于碳酸盐矿物具有更高的增汇潜力。

橄榄石作为碱性硅酸盐矿物之一，橄榄石相对于其他硅酸盐矿物具有更高的风化速率[36]，每摩尔橄榄石溶解可以吸收 4 摩尔二氧化碳，因此得到了广泛的研究[35, 37]。橄榄石在自然界中分布广泛，通常分布于上地幔和俯冲带中[38]。橄榄石在我国主要分布在内蒙古、陕西、河南、湖北等地，其中河南西峡与湖北宜昌的橄榄石产量高，应用广泛。橄榄石在挪威、瑞典、意大利等地均有分布[39]。

橄榄石的溶解在海水中受比表面积、pH、温度等诸多因素的影响。橄榄石的比表面积越大，橄榄石的溶解速率越快。Rigopoulos 等[40]通过将橄榄石研磨增加橄榄石的比表面积提高了橄榄石对二氧化碳的吸收速率。Hangx 等[41]结合实验室橄榄石溶解动力学数据对不同粒径的橄榄石在海水中的固碳效率进行研究，10 μm 粒径橄榄石完全溶解需要 23 年，而 300 μm 粒径橄榄石的溶解需要 700 年，使用橄榄石进行海洋碱化需要粒径小于 10 μm才能在 15～20 年内得到可观的增汇效果。Wogelius 等[42]通过不同 pH 下橄榄石溶解实验证明，pH 与橄榄石的溶解速率成反比。海洋中二氧化碳的溶解会影响海水的 pH，因此海水中二氧化碳浓度会对橄榄石的溶解速率造成影响，Wolff-Boenisch 等[43]验证了橄榄石在高二氧化碳分压下的溶解速率更高。工业革命以来，近 1/3 人为排放的二氧化碳被海洋吸收，导致海洋酸化，这将进一步促进橄榄石的溶解。Prigiobbe 等[44]在不同的温度下对橄榄石的溶解速率进行了评估，研究表明，橄榄石的溶解速率与温度成正比，其中 90℃下的反应温度是 25℃下的 100 倍。

在实际应用场景中，海洋的 pH 和温度等条件无法人为的大范围调控，因此通过提高橄榄石的比表面积以增加橄榄石的溶解速率是海洋橄榄石碱化的关键。Köhler 等[45]提出橄榄石粒径在 1 μm 左右才能在被移出大洋混合层前完全溶解。从碳足迹的角度而言，橄榄石的破碎和研磨过程会释放更多的二氧化碳，因此，在大洋施加橄榄石具有一定的局限性。Montserrat 等[35]提出了在近海施加橄榄石的方案，一方面是将大粒径橄榄石施加在大陆架海域，借助海流的剪应力可以促进橄榄石的磨损，进而促进橄榄石的溶解；另一方面是通过将小粒径的橄榄石施加在海滩和潮间带，借助潮汐以促进橄榄石的磨损和溶解。高碱度的海水通过溶解度泵吸收更多大气中的二氧化碳，而在该过程中，高碱度海水的扩散受海水交换速率的影响，停留时间会对固碳速率造成影响，在海流的作用下由近海海域输送至远海，增加海－气交换界面面积将进一步提高固碳速率。

为了加速橄榄石的溶解速率以及高碱度海水的扩散，将橄榄石的反应体系以海上平台的形式布放在近海海域，并通过风能、潮汐能、太阳能等清洁能源对橄榄石进行破碎、研磨以加速橄榄石的溶解，高碱度的海水可以快速地输送至周围海域，提高固碳效率，同时可以避免在近岸海域溶解产物的过量累积造成的生态影响。此外，该方式可以与海上油气平台等高二氧化碳排放点源结合，进一步提高橄榄石溶解效率。在过去的数年里，海洋油气勘探已成为全球油气资源的重要战略替代，海洋油气能源供应在全球能源供应中的占比具有增长的趋势[46]。我国近海油气资源增长潜力大，具有可持续发展性[47]。此外，两者的结合可以减少橄榄石海上平台搭建的成本。因此，在我国海上油气开采平台进行橄榄石增汇具有广阔的应用前景（图 3）。

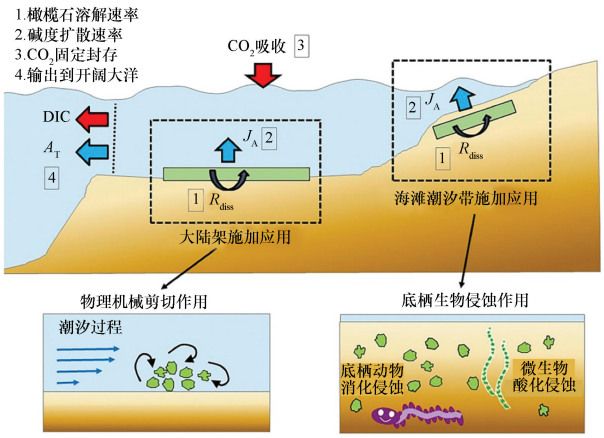

图 3　橄榄石在近海的增强风化[35]

Fig. 3　Schematic diagram of enhanced olivine weathering in coastal systems [35]

4 结论与建议

化石能源是现代人类社会的主要能源，其开发和利用推动了社会的高速发展，但同时也造成了温室气体的二氧化碳大量排放，导致全球变暖、海平面升高、水体酸化缺氧等负面环境效应，严重威胁着人类社会的可持续发展。海洋作为地表最大碳库，增汇潜力巨大，相关技术的应用有望捕集与封存大气二氧化碳，助力碳中和的实现。目前，存在多种海洋增汇技术途径，其中以海洋碱化增汇技术的增汇潜力相对较大、机理研究相对完备。橄榄石作为碱性硅酸盐矿物之一，相比于碳酸盐矿物具有更高的固碳效率，相对于其他硅酸盐矿物则具有更高的风化速率。同时，橄榄石矿在我国具有丰富且广泛的矿储量，是我国实施海洋碱化增汇技术的理想矿物。

添加橄榄石以增加海洋的固碳效能，受控于橄榄石在海洋环境的溶解速率。海水溶解橄榄石受矿物粒径(比表面)、环境 pH、温度以及海流冲刷机械力等诸多因素影响，其中橄榄石的粒径是碱化增汇人为调控的关键因素。现有研究表明，橄榄石添加实现海水碱化增汇，以机械破碎为数十微米粒径且在近岸陆架海域投放实施为效率最佳的技术实施条件。尽管，现已具备橄榄石碱化海水增汇的理论基础，同时海洋碱化增汇技术是人为加速碱性矿物的自然风化过程，是针对全球变暖基于自然的解决方案，潜在环境生态风险小，但仍缺乏广域大规模实施橄榄石碱化海水增汇对生态环境影响的直观证据，亟待进行相关研究和实验验证。此外，橄榄石破碎和长途运输涉及能耗，以及产业化应用的成本－效益问题。一方面需要相关经济学分析研究；另一方面需要多技术融合开发多场景应用的海洋碱化增汇工程装备。其中，通过将橄榄石海上反应平台与海上油气平台进行结合，不仅可以节省橄榄石海上平台的基建成本，橄榄石对油气平台的生产过程中产生的二氧化碳的捕集转化将进一步提高二氧化碳的固定效率，有效实现碳封存。

参考文献(References)：

[1] OESCHGER H, HEIMANN M. Uncertainties of predictions of future atmospheric CO_2 concentrations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1983, 88(C2): 1258－62.

[2] JOOS F, SPAHNI R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(5): 1425－30.

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[4] DONEY S C, FABRY V J, FEELY R A, et al. Ocean acidification: the other CO_2 problem [J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1(1): 169－92.

[5] LIU Jinping, CURRY J A, WANG Huijun, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(11): 4074－9.

[6] PETOUKHOV V, SEMENOV V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: 13568.

[7] ROGELJ J, DEN ELZEN M, HÖHNE N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2℃[J]. Nature, 2016, 534(7609): 631－9.

[8] DUDLEY B. BP statistical review of world energy [J]. BP statistical review, 2021, 6(2018): 116.

[9] 赵浩博. 论我国能源结构战略性调整策略 [J]. 财经界, 2016(21): 367－8.
ZHAO Haobo. Study on the strategic adjustment strategy of China's energy structure [J]. Financial Community, 2016(21): 367－8.

[10] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, et al. Global carbon budget 2020 [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269－340.

[11] HOLMÉN K. The global carbon cycle [C]Butcher S S, Charlson R J, Orians G H, et al. International Geophysics. Massachusetts; Academic Press. 1992: 239－62.

[12] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J]. 中国科学：地球科学, 2018, 48(11): 1393－421.
JIAO Nianzhi, LIANG Yantao, ZHANG Yongyu, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61: 1535－1563.

[13] JIAO Nianzhi, HERNDL G J, HANSELL D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean [J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(8): 593－9.

[14] POST W M, PENG T H, EMANUEL W R, et al. The global carbon cycle [J]. American Scientist, 1990, 78(4): 310－26.

[15] 孙军. 今生颗石藻的有机碳泵和碳酸盐反向泵[J]. 地球科学进展, 2007 (12): 1231－9.
SUN Jun. Organic carbon pump and carbonate counter pump of living coccolithophorid [J]. Advances in Earth Science, 2007 (12): 1231－9.

[16] RENAUD S, ZIVERI P, BROERSE A T C. Geographical and seasonal differences in morphology and dynamics of the coccolithophore *Calcidiscus leptoporus* [J]. Marine Micropaleontology, 2002, 46(3－4): 363－85.

[17] HENSON S A, SANDERS R, MADSEN E. Global patterns in efficiency of particulate organic carbon export and transfer to the deep ocean [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(1).

[18] LEGENDRE L, RIVKIN R B, WEINBAUER M G, et al. The microbial carbon pump concept: potential biogeochemical significance in the globally changing ocean [J]. Progress in Oceanography, 2015, 134: 432－50.

[19] 蔡阮鸿, 郑强, 陈晓炜, 等. 微型生物碳泵研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(2): 355－66.
CAI Ruanhong, ZHENG Qiang, CHEN Xiaowei, et al. Research Progress on microbial carbon pump [J]. Xiamen Univ. Nat. Sci., 2021, 60(2): 355－66.

[20] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO_2[J]. Science, 2004, 305(5682): 367－71.

[21] National Academies of Sciences E, Medicine. A research strategy for ocean-based carbon dioxide removal and sequestration [M]. Washington: The National Academies Press, 2021.

[22] YOON J E, YOO K C, MACDONALD A M, et al. Reviews and syntheses: Ocean iron fertilization experiments-past, present, and future looking to a future Korean Iron Fertilization Experiment in the Southern Ocean (KIFES) project [J]. Biogeosciences, 2018, 15(19): 5847－89.

[23] CALDEIRA K, BALA G, CAO L. The science of geoengineering [J]. Annu Rev Earth Pl Sc, 2013, 41: 231－56.

[24] OSCHLIES A, PAHLOW M, Yool A, et al. Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the sorcerer's apprentice [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37.

[25] JIAO Nianzhi, TANG Kai, CAI Haiyuan, et al. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land [J]. Nature Reviews Microbiology, 2011, 9(1).

[26] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179－87.
JIAO Nianzhi. Develop Ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(2): 179－87.

[27] 潘德炉, 李腾, 白雁. 海洋:地球最巨大的碳库 [J]. 海洋学研究, 2012, 30(3): 1－4.
PAN Delu, LI Teng, BAI Yan. Ocean: Earth's largest carbon reservoir [J]. Journal of Marine Sciences, 2012, 30(3): 1－4.

[28] RENFORTH P, HENDERSON G. Assessing Ocean alkalinity for carbon sequestration [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(3): 636－74.

[29] ZEEBE R E, WOLF-GLADROW D. CO_2 in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.

[30] BACH L T, GILL S J, RICKABY R E M, et al. CO_2 removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems [J]. Frontiers in Climate, 2019, 1(7).

[31] HOEGH-GULDBERG O, MUMBY P J, HOOTEN A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. Science, 2007, 318(5857): 1737－42.

[32] ORR J C, FABRY V J, AUMONT O, et al. Anthropogenic Ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms [J]. Nature, 2005, 437(7059): 681－6.

[33] GRIFFIOEN J. Enhanced weathering of olivine in seawater: the efficiency as revealed by thermodynamic scenario analysis [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 536－44.

[34] TAYLOR L L, QUIRK J, THORLEY R M S, et al. Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification [J]. Nature Climate Change, 2015, 6(4): 402－6.

[35] MONTSERRAT F, RENFORTH P, HARTMANN J, et al. Olivine dissolution in seawater: implications for CO_2 sequestration through enhanced weathering in coastal environments [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(7): 3960－72.

[36] VELBEL M A. Dissolution of olivine during natural weathering [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2009, 73(20): 6098－113.

[37] WANG F, DREISINGER D, JARVIS M, et al. Kinetics and mechanism of mineral carbonation of olivine for CO_2 sequestration [J]. Minerals Engineering, 2019, 131(1): 185－97.

[38] 张琦. 橄榄石的研究现状及其地质学意义[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(4): 459－64.
ZHANG Qi. Research Status of Olivine and Its Geological

Significance [J]. Advances in Geosciences, 2021, 11(4): 459－64.

[39] 孟超，孟庆新，李晓龙，等. 天然镁橄榄石在耐火行业的应用现状及展望[J]. 耐火与石灰，2021，46(4)：29－33.
MENG Chao, MENG Qingxin, LI Xiaolong, et al. Application status and prospect of natural forsterite in refractory industry [J]. Refractory and lime, 2021, 46(04): 29－33.

[40] RIGOPOULOS I, PETALLIDOU K C, VASILIADES M A, et al. Carbon dioxide storage in olivine basalts: effect of ball milling process [J]. Powder Technology, 2015, 273: 220－9.

[41] HANGX S J T, SPIERS C J. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO_2 concentrations: a critical analysis of viability [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(6): 757－67.

[42] WOGELIUS R A, WALTHER J V. Olivine dissolution at 25℃: effects of pH, CO_2, and organic acids [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1991, 55(4): 943－54.

[43] WOLFF-BOENISCH D, WENAU S, GISLASON S R, et al. Dissolution of basalts and peridotite in seawater, in the presence of ligands, and CO_2: implications for mineral sequestration of carbon dioxide [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2011, 75(19): 5510－25.

[44] PRIGIOBBE V, HANCHEN M, COSTA G, et al. Analysis of the effect of temperature, pH, CO_2 pressure and salinity on the olivine dissolution kinetics [J]. Enrgy Proced, 2009, 1(1): 4881－4.

[45] KÖHLER P, ABRAMS J F, VOLKER C, et al. Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO_2, surface ocean pH and marine biology [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(1): 14009.

[46] 马睿. 海上油气开发迎来新上升周期[EB/OL]. (2022－03－29). http://news.cnpc.com.cn/system/2022/03/29/030063779.shtml.
MA Rui. A new upcycle of developing offshore oil and gas [EB/OL]. (2022－03－29). http://news.cnpc.com.cn/system/2022/03/29/030063779.shtml.

[47] 谢玉洪. 中国海油近海油气勘探实践与思考[J]. 中国海上油气，2020，32(2)：1－13.
XIE Yuhong. China offshore oil and gas exploration: practice and thinking [J]. China offshore oil and gas, 2020, 32(2): 1－13.