

# 俯冲和岩浆过程中的地球深部碳循环

李海勇<sup>1,2,3</sup>, 张锦昌<sup>1,2,3</sup>, 胡静远<sup>4</sup>, 叶俊民<sup>4</sup>

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广州 511458
3. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 中国科学院-巴基斯坦高等教育委员会, 巴基斯坦伊斯兰堡 45320
4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

**摘要** 地球表层短周期的地表碳循环影响全球气候变化和地球宜居环境, 而地球上 90% 以上的碳存在于地球内部, 地球内部长周期的深部碳循环对地表碳循环产生重要影响。介绍了汇聚板块边界、离散板块边界、板块内部和新型海山等不同构造背景深部碳循环的研究现状, 并阐述将来需要深入研究的科学问题, 包括俯冲带脱碳机制及其效率、碳在地幔中的存在形式等。

**关键词** 俯冲作用; 岩浆作用; 深部碳循环; 气候变化

对于人类而言, 碳是地球上最重要的元素之一。碳的循环明显影响气候变化、生态平衡、能源替代以及环境恢复等与人类生存息息相关的科学问题, 一直是地球环境科学研究的重点领域, 倍受人们关注<sup>[1]</sup>。碳循环过程可以划分为 2 种亚循环过程: 一是在固体地球外部的大气圈、水圈、生物圈(包括人类活动)以及浅地表层内, 循环周期万年尺度的地表碳循环; 二是地球内部的岩石圈、软流圈、

地幔和地核之间的, 循环周期百万年以上的地球深部碳循环。在地质历史时期, 大气中的 CO<sub>2</sub> 被海水溶解并以碳酸盐的形式沉淀在沉积物、大洋地壳和橄榄岩地幔中, 这些地表系统的含碳物质通过板块俯冲作用进入深部地球系统, 俯冲过程中的变质脱碳反应以及各类深部地幔岩浆作用(岛弧岩浆作用、洋中脊岩浆作用及地幔柱岩浆作用等), 又把一部分地球内部的含碳物质以 CO<sub>2</sub> 的形式返回地表

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-12-27

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(GML2019ZD0205); 国家自然科学基金项目(91858207, 92058209, 91958212); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515011244, 2021B1515020098); 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室 A 类课题(OMG2019-1)

作者简介: 李海勇, 副研究员, 研究方向为海洋地球化学, 电子邮箱: hyl@sesio.ac.cn

引用格式: 李海勇, 张锦昌, 胡静远, 等. 俯冲和岩浆过程中的地球深部碳循环[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 80-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.009

和大气(图1),直接参与地表碳循环演化过程<sup>[2]</sup>。近年来,对地表碳循环已经有了较深入的研究,对深部碳循环的研究还处在起步阶段<sup>[3]</sup>。研究发现,地球上90%以上的碳深埋于地球内部,超过2/3的碳可能存在于地球内核,这些含碳的物质在固体地球形成和演化过程中起到重要作用,也是地表碳循

环的主要物质来源<sup>[4]</sup>。因此,地球深部碳循环对地表系统地质尺度上全球规模的气候变化起到了至关重要的控制和影响作用,研究深部碳循环对研究地表碳循环具有重要的指示意义,碳循环是地球科学交叉领域中最为前沿的问题之一。

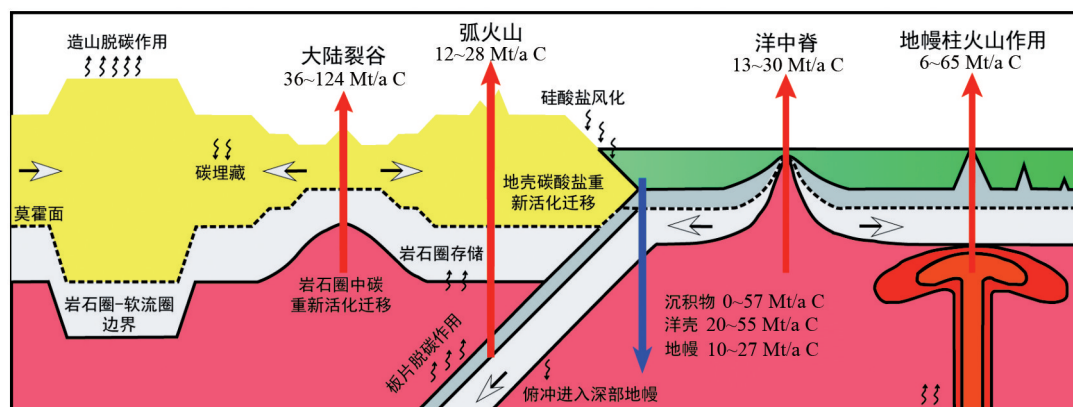


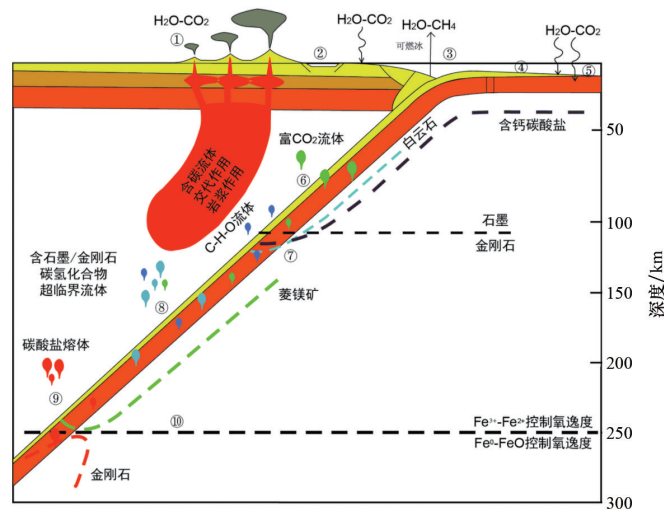
图1 全球深部碳循环示意(据文献[5]修改)

## 1 汇聚板块边界深部碳循环

### 1.1 俯冲带脱碳作用

俯冲过程是板块构造运动的核心过程,驱动地球的进一步分异演化,并实现圈层间物质循环和能量交换,固体地球长期碳循环主要发生在板块俯冲带,俯冲带是连接地表碳循环和深部碳循环的纽带<sup>[6]</sup>。海水中的 $\text{CO}_2$ 通过变质和热液蚀变作用可以使新生洋壳基性岩和超基性岩发生水化和碳酸盐化并在其中沉淀出碳酸盐矿物<sup>[7]</sup>,陆壳风化产物以及海底生物作用形成的钙质碳酸盐(方解石和文石)在洋壳上沉淀进入沉积物<sup>[8]</sup>,这些地表系统的碳以有机碳或碳酸盐矿物的形式进入地球深部。俯冲带深部的含碳物质主要包括碳酸盐矿物、石墨、金刚石、各种碳氢化合物、C-O-H流体以及各种含碳熔体等(图2),这些含碳相可以通过各种地质作用而相互转变<sup>[9]</sup>。众多研究表明,进入俯冲带中的碳主要通过变质脱碳反应<sup>[10]</sup>、流体溶解作用<sup>[11]</sup>、熔

融作用<sup>[12]</sup>和氧化还原反应<sup>[13]</sup>活化形成C-O-H流体而迁移进入上覆地幔楔,并最终折返回地表。近年来,相平衡模拟计算表明,冷俯冲带不能发生明显的碳酸盐分解、变质脱碳及沉积物/洋壳部分熔融等脱碳过程<sup>[14]</sup>,有限的 $\text{CO}_2$ 释放无法解释岛弧火山岩中大量 $\text{CO}_2$ 存在的事实。镁铁碳酸盐矿物在弧下地幔源区80~160 km深度仍可稳定存在,甚至直至地幔过渡带才发生明显的脱碳<sup>[14]</sup>。Frezzaoti等<sup>[15]</sup>在阿尔卑斯冷俯冲带发现石榴石斑晶中存在金刚石与流体包裹体,并认为金刚石是在变质流体中结晶而成,直观证实流体可以溶解碳。Ague等<sup>[16]</sup>在希腊高压变质带的钙质大理岩中发现相当部分的碳酸盐被变质流体溶解后带走的通道,并提出在俯冲带中大部分碳酸盐可能被变质流体溶解后带入岛弧区。实验岩石学也支持富水沉积物在脱流体过程中会促进碳酸盐的分解,使得俯冲板片在较浅的深度就可以发生明显的脱碳作用<sup>[17]</sup>。因此,流体溶解作用是目目前俯冲带浅部脱碳比较流行的机制。



①火山脱碳作用;②大陆壳风化作用;③蛇纹岩化+碳酸盐化;④远洋沉积作用;⑤洋壳碳酸盐化作用;⑥俯冲流体脱碳作用;  
⑦白云石分解作用;⑧含碳相氧化还原作用;⑨碳酸盐熔融作用;⑩地幔碳酸盐或碳酸盐熔体氧化还原作用

图2 俯冲带深部碳循环示意(据文献[9]修改)

## 1.2 岛弧火山岩

全球俯冲带的总长度约为5.5万 km,其中大洋岛弧长度约为2.2万 km,约占整个俯冲带长度的40%。根据上覆板块性质的不同,岩浆弧可分为洋-洋俯冲的大洋或洋内岛弧和洋-陆俯冲的活动大陆边缘弧,弧玄武岩记录了大洋俯冲带地幔富集机制和地幔深部动力学过程方面的重要信息,是探索地幔交代作用、物质循环以及深部动力学过程的重要岩石探针<sup>[18]</sup>。

大量研究发现,弧下地幔橄榄岩经历广泛的含CO<sub>2</sub>流体或碳酸盐熔体的交代作用。勘察加半岛发现富含磷灰石、角闪石和金云母等交代成因矿物的二辉橄榄岩或交代脉体,由碳酸盐熔体与地幔楔橄榄岩发生反应而形成<sup>[19]</sup>。勘察加半岛和吕宋岛弧橄榄岩包体的橄榄石中存在富CO<sub>2</sub>流体包裹体,部分包裹体中含有菱镁矿<sup>[20-21]</sup>;在全球多个蛇绿岩带的地幔橄榄岩和铬铁矿中发现轻C同位素组成的金刚石<sup>[22]</sup>,这些是含碳物质在地幔中最为直观的体现。Peng等<sup>[23]</sup>在西南天山高压-超高压变质带中发现大量经历高压变质作用蛇绿碳酸盐(由白云石、文石和镁方解石组成),为含碳变基性岩衍生的含碳流体在1500~2500 MPa和550~600℃的条件下交代蛇纹石化橄榄岩的产物。此外,岛弧玄武岩中

的熔体包裹体和火山气体研究表明,原始的岛弧玄武质岩浆至少包含大于 $3 \times 10^{-3}$ 的CO<sub>2</sub><sup>[24-25]</sup>。马东东等<sup>[26]</sup>对马尼拉岛弧火山岩进行了Ca同位素分析,发现 $\delta^{44}\text{Ca}$  (0.70‰~0.85‰) 低于原始地幔值(0.94‰),说明源区中可能加入了4%~5%海相沉积碳酸盐岩。Wang等<sup>[27]</sup>发现汤加和马里亚纳岛弧火山岩与MORB具有不可区分的 $\delta^{44}\text{Ca}$ 值,但汤加和马里亚纳岛弧有大量二氧化碳脱气,说明碳酸盐确实被板片流体带入到弧下地幔源区,这可能是由于板片流体迁移的碳酸盐岩Ca含量有限或者反映了高度变化的俯冲组分对地幔楔的均一化影响。

鉴于岛弧火山岩具有极高的挥发成分含量,使其成为将地球深部的碳释放到地表进而影响环境气候变化的重要环节,通过岛弧每年释放的深部的碳约为1200万~2800万 t。

## 2 离散板块边界深部碳循环

大洋中脊体系全长近6万 km,平均高2 km,宽2 km,形成了覆盖地球表面积60%以上的大洋地壳,是地球表面最大的造山带,可分为快速扩张洋脊、中速扩张洋脊和慢速扩张洋脊,是研究地球内部地幔矿物和化学组成、流体活动、岩浆运移和地

幔熔融动力学的重要窗口。

洋中脊玄武岩岩浆源区  $\text{CO}_2$  含量的估算通常选择与其不相容性相似的 Ba 或 Nb 进行对比而获得。Cartigny 等<sup>[28]</sup>根据中大西洋洋中脊玄武岩得上地幔的  $\text{CO}_2/\text{Ba}$  和  $\text{CO}_2/\text{Nb}$  比值分别为 106 和 534, 分别获得上地幔软流圈  $\text{CO}_2$  含量为  $(427\pm 45) \mu\text{g/g}$  和  $(382\pm 82) \mu\text{g/g}$ 。Koleszar 等<sup>[29]</sup>计算获得北极附近的 Gakkel 洋脊玄武岩的  $\text{CO}_2$  甚至可以达到  $9159 \mu\text{g/g}$ 。Helo 等<sup>[30]</sup>根据橄榄石内熔体包裹体组成获得原始岩浆的  $\text{CO}_2$  含量可达  $3900 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{CO}_2/\text{Ba}$  比值可达 180。Michael 等<sup>[31]</sup>根据  $\text{CO}_2/\text{Ba}$  比值获得洋中脊玄武岩的  $\text{CO}_2$  含量为  $2085 \mu\text{g/g}$ , 远离地幔柱的 N-MORB 的  $\text{CO}_2$  含量为  $1840 \mu\text{g/g}$ , 地幔源区  $\text{CO}_2$  为  $183 \mu\text{g/g}$ 。Hauri 等<sup>[32]</sup>计算获得全球 MORB 地幔源区的  $\text{CO}_2$  为  $(182\pm 59) \mu\text{g/g}$ 。因此, 洋中脊玄武岩地幔源区的  $\text{CO}_2$  含量高度不均一, 高压结晶相(橄榄石)内熔体包裹体未经历明显去气作用, 可能更真实反映原始岩浆  $\text{CO}_2$  含量。此外, 祝红丽等<sup>[33]</sup>通过印度洋洋中脊玄武岩 Ca 同位素研究发现, 其地幔源区存在 2%~4% 古老海相碳酸盐。

通过大洋中脊每年释放的深部的碳为 1300 万~3000 万 t, 大部分以  $\text{CO}_2$  形式进入海水, 热液活动会导致海水中的  $\text{CO}_2$  封存在碳酸盐中<sup>[34]</sup>。因此, 有学者认为只有浅水区或暴露在海平面之上的洋中脊玄武岩的  $\text{CO}_2$  通量变化会对气候产生显著影响, 洋中脊对全球环境气候的影响有限<sup>[35]</sup>。

### 3 板块内部深部碳循环

#### 3.1 洋岛玄武岩

大洋底部广泛分布着大小不一的海山, 高度在 500~1000 m 的海山有 13.8 万余座, 而高于 100 m 的海山则超过 2500 万座, 并且多数分布在太平洋<sup>[36-37]</sup>。其中有相当数量海山为洋岛玄武岩(OIB), 因此是大洋板片内部岩石的重要组成部分。洋岛玄武岩在成因上通常被认为与“热点”和“地幔柱”有关, 是了解深部地幔信息的重要窗口。

通过橄榄岩包体的元素和同位素地球化学研究发现, 洋岛玄武岩地幔源区经历碳酸盐熔体广泛

交代<sup>[38]</sup>。Zhang 等<sup>[39]</sup>对 Caroline 海山链的碱性火山岩和地幔包体进行了详细研究, 发现橄榄岩包体存在方解石, 并且斜方辉石被高钙单斜辉石替代, 而认为橄榄岩被碳酸盐熔体交代, 同时推断出火山岩的地幔源区是碳酸盐化的辉石岩, 原始岩浆的  $\text{CO}_2$  含量约为 10%~15% (wt)。Yao 等<sup>[40]</sup>根据夏威夷 3 个洋岛火山岩的化学组成和橄榄石 Ni、Ca、Mn 元素分配规律, 揭示了复苏期火山岩原始岩浆具有高度富集  $\text{CO}_2$  的特征(质量百分比可达 10%), 可能起源于被碳酸盐熔体交代后的地幔柱橄榄岩, 与夏威夷地幔岩捕虏体含金刚石的现象相一致。Neave 等<sup>[41]</sup>对冰岛玄武岩中橄榄石熔体包裹体研究发现, 亏损的低 Ce/Y 比值包裹体包含约  $1200\times 10^{-6} \text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2/\text{Nb}$  约为 400。Miller 等<sup>[42]</sup>根据冰岛玄武岩橄榄石中熔体包裹体获得  $\text{CO}_2/\text{Ba}$  和  $\text{CO}_2/\text{Nb}$  比值分别为  $396\pm 48$  和  $1832\pm 316$ , 推测源区  $\text{CO}_2$  含量高于  $690 \mu\text{g/g}$ 。Anderson 等<sup>[43]</sup>对夏威夷的玄武岩发现, 地幔源区的  $\text{CO}_2$  含量为  $962 \mu\text{g/g}$ , 远高于 MORB 的地幔源区(约  $400 \mu\text{g/g}$ )。夏威夷玄武岩橄榄石中熔体包裹体具有高的  $\text{CO}_2$ , 约 1.3% (wt), 由此推算母岩浆的  $\text{CO}_2$  约为 0.7% (wt)<sup>[44]</sup>。通过新兴的非传统稳定同位素识别洋岛玄武岩源区的碳酸盐较为成功。Huang 等<sup>[45]</sup>研究发现夏威夷玄武岩(0.75‰~1.02‰)具有比典型地幔更轻的钙同位素组成( $1.05\text{‰}\pm 0.04\text{‰}$ ), 而且玄武岩的  $\delta^{44}\text{Ca}$  值与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和 Sr/Nb 值负相关, 模拟计算表明形成夏威夷玄武岩的地幔柱混入 4% 的古老海洋沉积碳酸盐。Wang 等<sup>[46]</sup>对南太平洋 Pitcairn 岛的 OIB 进行详细研究, 发现这些经典的 I 型富集地幔(EM1)OIB 的镁同位素组成比正常地幔明显偏轻, 指示 EM1 起源于再循环的古老(约 25 亿~26 亿年)含碳酸盐沉积物, 这些地球表层的沉积物可俯冲进入核幔边界长期保存, 并最终被地幔柱携带至浅部地幔熔融。Beunon 等<sup>[47]</sup>发现洋岛玄武岩具有比洋中脊玄武岩更高的锌含量和更重的锌同位素组成, 认为  $\leq 6\%$  的含碳洋壳俯冲进入饱满地幔参与熔融。Zhang 等<sup>[48]</sup>发现夏威夷复苏期火山岩具有明显比造盾期火山岩重的锌同位素组成, 并证实地幔源区含有亏损地幔橄榄岩和俯冲沉积碳酸盐组分, 并且沉积碳酸盐主要通过转化为镁质

碳酸盐组分后进入下地幔。Zhang 等<sup>[49]</sup>发现南太平洋和南大西洋经典高 U/Pb 地幔(HIMU)型 OIB 具有明显偏重的锌同位素组成,认为地表碳酸盐沉积物俯冲至地幔过渡带熔融形成碳酸盐熔体并发生交代而产生碳酸盐化橄榄岩,其随俯冲板片进入下地幔在核-幔边界长期存留,最终被上升的地幔柱带至上地幔熔融。

OIB 更加富集,所含挥发分通常为大洋中脊玄武岩(MORB)的数倍,尽管在数量上比洋中脊玄武岩少,但在深部碳循环上起了重要的作用,通过估算,洋岛每年释放深部的碳为 600 万~6500 万 t。

### 3.2 大火成岩省

大火成岩省是指在相对短暂的地质时间内由于持续或脉动式岩浆作用在板内构造环境中形成的大规模岩浆岩建造,最大喷发周期常常在 50 个百万年左右,喷出面积大于 0.1 Mkm<sup>2</sup>,岩浆量大于 0.1 Mkm<sup>3</sup>。根据其产出的环境可分为大陆大火成岩省和大洋大火成岩省,大洋大火成岩省的表现形式主要为洋底高原,已发现规模不一的洋底高原占大洋总面积的 5% 左右,主要分布在印度洋和太平洋之中。通过大火成岩省的研究,可以为人类了解超级大陆裂解历史、年轻地壳增生情况、资源探测和全球环境变化与生物大灭绝等提供重要线索。

Cheng 等<sup>[50]</sup>对塔里木大火成岩省的研究发现,玄武岩和镁铁质-超镁铁质层状侵入体具有轻的 Mg 同位素组成,来源于岩石圈地幔,源区受到方解石/白云石和榴辉岩产生的高硅熔体的改造,碳酸岩、霞石岩和金伯利岩亦具有轻的 Mg 同位素组成,来源于地幔柱,并且源区有菱镁矿或方镁石/钙钛矿的混入。然而,峨眉山大火成岩省(ELIP)二叠纪玄武岩的 Mg 同位素组成具有与地幔近乎一致的  $\delta^{26}\text{Mg}$  值,被解释为极少(<2%)再循环碳酸盐进入其下地幔源区<sup>[51]</sup>。峨眉山大火成岩省的苦橄岩的锌同位素组成非常均一,排除分离结晶和堆晶作用影响后,计算得到母岩浆的  $\delta^{66}\text{Zn}$  为  $0.33\text{‰}\pm 0.05\text{‰}$ ,比地幔的锌同位素值偏重,模拟计算表明,岩浆源区存在约 15% 的再循环洋壳物质(榴辉岩),没有或者仅有少量碳酸盐岩再循环进入下地幔<sup>[52]</sup>。可见,不同大火成岩省的地幔源区的碳含量可能存在

大的差异。

## 4 新型海山深部碳循环

近年来,在全球多个俯冲带边缘相继发现了一种特殊的火山类型,并且逐渐引起地球科学家的重视<sup>[53-56]</sup>。这种火山非常年轻,一般几个百万年,规模小,直径只有数公里,高度大多在 200~300 m 左右,一般小于 500 m,被称为“斑点”火山(Petit-spot volcanoes)。它们分布在俯冲板片外缘隆起向洋脊的后方,距海沟轴线 800 km 范围以内,且其所在位置没有地幔热柱相关证据。随后,在日本海沟、智利海沟、汤加海沟、印度洋的巽他海沟、小笠原-北马里亚纳海沟和中美洲俯冲带的增生楔等全球多个俯冲带边缘都陆续发现斑点火山。

经典的岩浆生成机制主要有 3 种:俯冲板片脱水引发上覆地幔楔加水熔融、洋中脊之下地幔被动上涌导致的减压熔融以及主动上涌的地幔热柱的加热熔融。鉴于斑点海山独有的特点,它们可能形成于一种特殊的机制。斑点海山主要有 3 种形成机制:一是俯冲板片的挠曲导致了外缘隆起后部岩石圈下部的拉张,张裂导致岩石圈-软流圈边界(LAB)附近及上地幔低程度的减压熔融<sup>[57]</sup>。二是俯冲板片后方的 LAB 深度处普遍含有一定量的部分熔融体,在某种机制下这些熔体从外缘隆起后方上升<sup>[58]</sup>。三是回退的板块造成俯冲板片后部含水的地幔转换带(MTZ)的抬升和脱水,并导致 MTZ 上方地幔部分熔融<sup>[59]</sup>。

斑点火山碱性玄武岩富集不相容元素,具有 EM1 型洋岛玄武岩的 Sr-Nb-Pb 同位素特征,说明源区可能存在再循环板片物质<sup>[59-60]</sup>。这些斑点海山碱性玄武岩中携带地幔包体和捕虏晶中发现 CO<sub>2</sub> 流体包裹体和熔体包裹体,直观说明地幔源区存在含碳物质<sup>[61]</sup>。Okumura 等<sup>[62]</sup>发现玄武岩具有多孔构造特征(10 vol%~60 vol%),通过测量玄武岩玻璃的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 含量,反演出初始含量分别 10% (wt) 和 1% (wt)。Liu 等<sup>[55]</sup>通过 Mg 同位素进一步识别出斑点海山的源区存在 2 个再循环组分:再循环古老海洋碳酸盐沉积物和再循环大洋榴辉岩/辉石

岩。此外, Machida 等<sup>[63]</sup>通过实验岩石学研究发现, 软流圈广泛存在富含 CO<sub>2</sub> 硅酸盐熔体, 这种熔体可能来自再循环板源物质熔融(富 CO<sub>2</sub> 流体或碳酸盐)。

Okumura 等<sup>[62]</sup>推算斑点海山释放的 CO<sub>2</sub> 高达  $2.7 \times 10^{11} \sim 5.4 \times 10^{11}$  g/a, 为岛弧火山和洋中脊火山的 1.2%(wt), 热点海山的 14%(wt)。由于斑点海山只是近年来开始受到关注, 并且体积太小, 这给其识别带来了巨大困难, 也就是说, 在全球众多俯冲带可能存在大量未识别的斑点海山, 因此, 斑点海山在全球深部碳循环中的作用可能被严重低估。

## 5 结论

深部碳循环控制不同含碳储库通量的变化, 进而影响地表的碳总量和宜居地球环境。俯冲作用和岩浆过程是地表系统和地球内部之间碳循环的主要途径。本文得出以下结论。

1) 俯冲带是深部碳循环的关键场所, 影响不同储库碳通量的变化, 需要进一步理解俯冲带脱碳机制及其效率, 并查明含碳相在俯冲带不同部位的重新固存情况, 以便更加准确估算俯冲带释放的碳通量。

2) 多种证据显示大量碳保留在不同构造背景地幔之中, 但这些地表碳是如何进入地幔, 在地幔中有哪些存在形式, 含量又是多少, 如何影响地幔的地球化学性质等问题值得深入研究, 这对地球深部碳循环的深入理解意义重大。

3) 地球深部碳循环通量是认识其对地表环境影响的基本前提。今后要精确估算不同构造背景的深部碳通量, 特别是俯冲带、大火成岩省、裂谷和新型海山等, 查明碳通量的差异及其对宜居环境的影响。

### 参考文献(References)

- [1] Dasgupta R. Ingassing, storage, and outgassing of terrestrial carbon through geologic time[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2013, 75: 183–229.
- [2] Berner R A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 323–326.
- [3] 张国良, 战明君. 板块俯冲和岩浆过程中碳循环及深部碳储库[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 36–45.
- [4] Lee C T A, Shen B, Slotnick B S, et al. Continental arc-island arc fluctuations, growth of crustal carbonates, and long-term climate change[J]. *Geosphere*, 2012, 9(1): 21–36.
- [5] Wong K, Mason E, Brune S, et al. Deep carbon cycling over the past 200 million years: A review of fluxes in different tectonic settings[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 263.
- [6] 刘勇胜, 陈春飞, 何德涛, 等. 俯冲带地球深部碳循环作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 1982–2003.
- [7] Rosenbauer R J, Thomas B, Bischoff J L, et al. Carbon sequestration via reaction with basaltic rocks: Geochemical modeling and experimental results[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 89: 116–133.
- [8] Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145(3/4): 325–394.
- [9] 张立飞, 陶仁彪, 朱建江. 俯冲带深部碳循环: 问题与探讨[J]. *矿物岩石地球化学通*, 2017, 36(2): 185–196.
- [10] Cook-Kollars J, Bebout G E, Collins N C, et al. Subduction zone metamorphic pathway for deep carbon cycling: I. Evidence from HP/UHP metasedimentary rocks, Italian Alps[J]. *Chemical Geology*, 2014, 386: 31–48.
- [11] Kelemen P B, Manning C E. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(30): 3997–4006.
- [12] Skora S, Blundy J, Brooker R, et al. Hydrous phase relations and trace element partitioning behaviour in calcareous sediments at subduction-zone conditions[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(5): 953–980.
- [13] Stagno V, Tange Y, Miyajima N, et al. The stability of magnesite in the transition zone and the lower mantle as function of oxygen fugacity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(19): L19309.
- [14] Thomson A R, Walter M J, Kohn S C, et al. Slab melting as a barrier to deep carbon subduction[J]. *Nature*, 2016, 529: 76–79.
- [15] Frezzotti M L, Huizenga J M, Compagnoni R, et al. Diamond formation by carbon saturation in C–O–H fluids during cold subduction of oceanic lithosphere[J]. *Geochi-*

- mica et *Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 68–86.
- [16] Ague J J, Nicolescu S. Carbon dioxide released from subduction zones by fluid-mediated reactions[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 355–360.
- [17] Duncan M S, Dasgupta R. CO<sub>2</sub> solubility and speciation in rhyolitic sediment partial melts at 1.5 to 3.0 GPa: Implications for carbon flux in subduction zones[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2014, 124: 328–347.
- [18] Zheng Y F, Xu Z, Chen L, et al. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 104185.
- [19] Kepezhinskas P, Defant M J. Contrasting styles of mantle metasomatism above subduction zones: Constraints from ultramafic xenoliths in Kamchatka[J]. *Geophysical Monograph*, 1996: 307–314.
- [20] Kawamoto T, Yoshikawa M, Kumagai Y, et al. Mantle wedge infiltrated with saline fluids from dehydration and decarbonation of subducting slab[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(24): 9663–9668.
- [21] Kobayashi M, Sumino H, Nagao K, et al. Slab-derived halogens and noble gases illuminate closed system processes controlling volatile element transport into the mantle wedge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 457: 106–116.
- [22] Yang J S, Wu W W, Lian D Y, et al. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 198–212.
- [23] Peng W G, Zhang L F, Menzel M D, et al. Multistage CO<sub>2</sub> sequestration in the subduction zone: Insights from exhumed carbonated serpentinites, SW Tianshan UHP belt, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 270: 218–243.
- [24] Wallace P J. Volatiles in subduction zone magmas: Concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data[J]. *Volcanol Geotherm Research*, 2005, 140(1/2/3): 217–240.
- [25] Blundy J, Cashman K V, Rust A, et al. A case for CO<sub>2</sub>-rich arc magmas[J]. *Earth Planet*, 2010, 290(3/4): 289–301.
- [26] 马东东, 刘芳, 祝红丽, 等. 菲律宾马尼拉新生代火山岩的 Sr–Nd–Pb–Ca 同位素特征: 对南海俯冲过程中深部碳循环的制约[J]. *地球化学*, 2018, 47(6): 593–603.
- [27] Wang X, Wang Z C, Liu Y S, et al. Calcium stable isotopes of Tonga and Mariana arc lavas: Implications for slab fluid-mediated carbonate transfer in cold subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(3): e2020JB020207.
- [28] Cartigny P, Pineau F, Aubaud C, et al. Towards a consistent mantle carbon flux estimate: Insights from volatile systematics (H<sub>2</sub>O/Ce, δD, CO<sub>2</sub>/Nb) in the North Atlantic mantle (14°N and 34°N)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 265(3/4): 672–685.
- [29] Koleszar A M, Saal A E, Hauri E H, et al. The volatile contents of the Galapagos plume: evidence for H<sub>2</sub>O and F open system behavior in melt inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(3/4): 442–452.
- [30] Helo C, Longpré M A, Shimizu N, et al. Explosive eruptions at midocean ridges driven by CO<sub>2</sub>-rich magmas[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(4): 260–263.
- [31] Michael P J, Graham D W. The behavior and concentration of CO<sub>2</sub> in the suboceanic mantle: Inferences from undegassed ocean ridge and ocean island basalts[J]. *Lithos*, 2015, 236/237: 338–351.
- [32] Hauri E H, MacLennan J, McKenzie D, et al. CO<sub>2</sub> content beneath northern Iceland and the variability of mantle carbon[J]. *Geology*, 2017, 46(1): 55–58.
- [33] 祝红丽, 张兆峰, 刘峪菲, 等. 印度洋中脊玄武岩钙同位素组成: 对古老海相碳酸盐再循环的制约[C]//中国地球科学联合学术年会. 北京: 中国地球物理学会, 中国地质学会, 2014: 1774.
- [34] Gillis K M, Coogan L A. Secular variation in carbon uptake into the ocean crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(3/4): 385–392.
- [35] Le Voyer M, Hauri E H, Cottrell E, et al. Carbon fluxes and primary magma CO<sub>2</sub> contents along the global mid-ocean ridge system[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(3): 1387–1424.
- [36] Wessel P, Sandwell D T, Kim S S. The global seamount census[J]. *Oceanography*, 2010, 23(1): 24–33.
- [37] Yesson C, Clark M R, Taylor M L, et al. The global distribution of seamounts based on 30 arc seconds bathymetry data[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(4): 442–453.
- [38] Neumann E R, Wulff-Pedersen E, Pearson N J, et al. Mantle xenoliths from Tenerife (Canary Islands): Evidence for reactions between mantle peridotites and silicic carbonatite melts inducing Ca metasomatism[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(5): 825–857.
- [39] Zhang G L, Wang S, Zhang J, et al. Evidence for the essential role of CO<sub>2</sub> in the volcanism of the waning Caroline mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*

- ta, 2020, 290: 391–407.
- [40] Yao J H, Huang J, Zhang G L. Zinc isotope constraints on carbonated mantle sources for rejuvenated-stage lavas from Kauai, Hawaii[J]. *Chemical Geology*, 2022, 605: 120967.
- [41] Neave D A, MacLennan J, Edmonds M, et al. Melt mixing causes negative correlation of trace element enrichment and CO<sub>2</sub> content prior to an Icelandic eruption[J]. *Earth Planet*, 2014, 400: 272–283.
- [42] Miller W G R, MacLennan J, Shorttle O, et al. Estimating the carbon content of the deep mantle with Icelandic melt inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 523: 115699.
- [43] Anderson K R, Poland M P. Abundant carbon in the mantle beneath Hawaii[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10 (9): 704–708.
- [44] Moore L R, Gazel E, Bodnar R J. The volatile budget of Hawaiian magmatism: Constraints from melt inclusions from Haleakala volcano, Hawaii[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2021: 410: 107144.
- [45] Huang S C, Farkas J, Jacobsen S B. Stable calcium isotopic compositions of Hawaiian shield lavas: Evidence for recycling of ancient marine carbonates into the mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 4987–4997.
- [46] Wang X J, Chen L H, Hofmann A W, et al. Recycled ancient ghost carbonate in the Pitcairn mantle plume[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115: 8682–8687.
- [47] Beunon H, Mattielli N, Doucet L S, et al. Mantle heterogeneity through Zn systematics in oceanic basalts: Evidence for a deep carbon cycling[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 205: 103174.
- [48] Zhang G L, Wang S, Huang S C, et al. CO<sub>2</sub>-Rich rejuvenated stage lavas on Hawaiian Islands[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2022, 23(9): 1–17.
- [49] Zhang X Y, Chen L H, Wang X J, et al. Zinc isotopic evidence for recycled carbonate in the deep mantle[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 6085.
- [50] Cheng Z G, Zhang Z C, Xie Q H, et al. Subducted slab-plume interaction traced by magnesium isotopes in the northern margin of the Tarim Large Igneous Province[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2018, 489: 100–110.
- [51] Tian H C, Yang W, Li S G, et al. Could sedimentary carbonates be recycled into the lower mantle? Constraints from Mg isotopic composition of Emeishan basalts[J]. *Lithos*, 2017: 292/293: 250–261.
- [52] Yang C, Liu, S A. Zinc isotope constraints on recycled oceanic crust in the mantle sources of the Emeishan Large Igneous Province[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(12): 12537–12555.
- [53] Hirano N, Kawamura K, Hattori M, et al. A new type of intra-plate volcanism; Young Alkali-basalts discovered from the subducting Pacific Plate, northern Japan Trench [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(14): 2719–2722.
- [54] Machida S, Hirano N, Sumino H, et al. Petit-spot geology reveals melts in upper-most asthenosphere dragged by lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 267–279.
- [55] Liu J, Hirano N, Machida S, et al. Melting of recycled ancient crust responsible for the Gutenberg discontinuity [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1–9.
- [56] Yang J, Faccenda M. Intraplate volcanism originating from upwelling hydrous mantle transition zone[J]. *Nature*, 2020, 579(7797): 88–91.
- [57] Hirano N, Takahashi E, Yamamoto J, et al. Volcanism in response to plate flexure[J]. *Science*, 2006, 313 (5792): 1426–1428.
- [58] Yamamoto J, Korenaga J, Hirano N, et al. Melt-rich lithosphere-asthenosphere boundary inferred from petit-spot volcanoes[J]. *Geology*, 2014, 42(11): 967–970.
- [59] Machida S, Hirano N, Kimura J I. Evidence for recycled plate material in pacific upper mantle unrelated to plumes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 3028–3037.
- [60] Michael P J, Graham D W. The behavior and concentration of CO<sub>2</sub> in the suboceanic mantle: Inferences from undegassed ocean ridge and ocean island basalts[J]. *Lithos*, 2015, 236/237: 338–351.
- [61] Yamamoto J, Hirano N, Abe N, et al. Noble gas isotopic compositions of mantle xenoliths from northwestern Pacific lithosphere[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3): 313–323.
- [62] Okumura S, Hirano N. Carbon dioxide emission to Earth's surface by deep-sea volcanism[J]. *Geology*, 2013, 41(11): 1167–1170.
- [63] Machida S, Kogiso T, Hirano N. Petit-spot as definitive evidence for partial melting in the asthenosphere caused by CO<sub>2</sub>[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1–7.

## Deep carbon cycle and livable earth during subduction and magmatic processes

LI Haiyong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinchang<sup>1,2,3</sup>, HU Jingyuan<sup>4</sup>, YE Junmin<sup>4</sup>

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
2. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China
3. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Science, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan
4. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

**Abstract** The short-term surface carbon cycle on the Earth's surface affects global climate change and the Earth's livable environment. More than 90% of the carbon content is stored in the deep Earth. The long-term deep carbon cycle in the Earth's interior has an important impact on the surface carbon cycle. Studying the deep carbon cycle has an important indicator significance for the surface carbon cycle. The carbon cycle is one of the most cutting-edge issues in the interdisciplinary field of geoscience. This paper presented a brief overview of deep carbon cycle in different tectonic backgrounds, such as convergent plate boundary, discrete plate boundary, intraplate environment and new type seamount, and expounds the scientific problems that need to be studied in depth in the future, which may cause the peer to pay more attention to the relevant research of deep carbon cycle, such as decarbonization mechanism and efficiency of subduction zone, and the existing form of carbon in mantle, et al.

**Keywords** subduction; magmatism; deep carbon cycle; climate change ●



(责任编辑 王志敏)