从碳源到碳汇:大陆弧演化过程中岩浆与剥蚀作用对长期碳循环的影响*

姜禾禾
Jiang HeHe

多伦多大学地球科学系,多伦多 ON M5S 3B1
Department of Earth Sciences, University of Toronto, Toronto ON M5S 3B1, Canada
2022-01-15 收稿, 2022-04-06 改回.

Jiang HH. 2022. From carbon source to carbon sink: Influences of magmatism and erosion in continental arcs on long-term carbon cycle. *Acta Petrologica Sinica*, 38(5):1302-1312, doi:10.18654/1000-0569/2022.05.02

Abstract On multimillion-year time scales, the long-term stability of atmospheric-oceanic P_{CO_2} is dominantly determined by the balance between the rate of CO_2 input from magmatic/metamorphic degassing and the efficiency of CO_2 uptake by silicate weathering. Continental arcs are characterized by episodic voluminous magmatic flare-ups in the time scale of tens to hundreds of millions of years. Flare-ups in continental arc result in increasing CO_2 outgassing, which enhances CO_2 concentration in the atmosphere and greenhouse climate. However, development of continental magmatic arc often accompanies with rapid arc unroofing and erosion due to magmatic/tectonic thickening of the crust, thus also enhances the chemical weathering flux, which in turn increases the CO_2 sink. With the coupled magmatism and erosion processes in continental arcs, during the rise and fall and continental arcs, regionally the arc serves as either a carbon source or sink depending on the stage of the arc life. The development of continental arcs increases weatherability through mountain building processes, and therefore may increase the strength of the global negative feedback between silicate weathering and climate. In this way continental arcs play an important role in sustaining the Earth habitability.
Key words Continental arc; Magmatism; Erosion; Carbon source; Carbon sink; Carbon cycle

摘 要 在百万年时间尺度上,大气、海洋中的二氧化碳浓度(P_{CO_2},二氧化碳分压)和长期变化主要受岩浆-变质脱碳作用和硅酸盐风化作用(消耗二氧化碳)控制。因此,地球表层主要构造活动带的构造-岩浆活动对长期碳循环具有重要的驱动作用。本文在总结已发表文献的基础上,系统评估了大陆弧,尤其是晚白垩世大陆弧的岩浆作用和剥蚀作用的碳通量,并以此为依据探讨了大陆弧演化对于全球长期碳循环的影响。大陆弧岩浆作用以周期性(几十万年至一百百万年)岩浆爆发(magmatic flare-ups)为特征。在一个周期内,大规模岩浆喷发会导致 CO_2 排放量大幅度增加,促进温室效应。但同时,大规模的岩浆作用又会导致地壳增厚和和地表抬升,从而促进剥蚀作用、提高化学风化通量,进而增加 CO_2 消耗量。对于单个的大陆弧来说,在其演化的不同阶段对于碳循环扮演着不同的角色:演化早期由于岩浆作用起主导作用,表现为净碳源;而在岩浆作用减弱或停止后,由于剥蚀作用的持续进行,表现为净碳汇。因此,从长周期和全球尺度上讲,大陆弧岩浆活动表现的"碳源属性"受到化学风化作用表现的"碳汇属性"的调节,使得地球环境在长期的地质演化过程中维系宜居性。
关键词 大陆弧;岩浆作用;剥蚀作用;碳源;碳汇;碳循环
中图法分类号 P532; P588.11

在地质历史时期,地球曾经历多次冰室和温室气候转变。学术界广泛认为,显生宙以来这种长期的气候变化受海洋-大气系统中温室气体浓度的控制。二氧化碳作为重要的温室气体,其在海洋-大气系统中的浓度(或分压,P_{CO_2})是长期气候变化的主要控制因素之一。长期碳循环涉及百万年时间尺度上固体地球(或内生系统,endogenic system)和地球

* 本文受国家自然科学基金基础科学中心项目(41888101)资助.
第一作者简介:姜禾禾,女,1988 年生,博士后,从事岩石地球化学研究,E-mail: jiang.hehe0518@gmail.com

海洋-大气系统环境（或外生系统，exogenic system）之间的碳迁移（Berner，1991）。在这个时间尺度上，海洋-大气系统中 P_{CO_2} 变化取决于由岩浆、变质脱气作用带来的碳排放，以及由于硅酸盐风化和有机碳埋藏驱动的碳酸盐岩沉积带来的碳消耗之间的消长（Berner，1991；Kump *et al.*，2000）。由于外生系统的碳库相对于内生系统较小，一般认为在十万年的时间尺度上，海洋-大气系统中 P_{CO_2} 和气候的稳定性主要通过硅酸盐风化和气候之间的负反馈作用维系（Walker *et al.*，1981）。在百万年的时间尺度上，全球海洋-大气系统中的 CO_2 输入和输出通量通常被认为已达到均衡态（steady state）（Berner，1991），因此长期 P_{CO_2} 的变化主要受地质脱碳排放速率，以及硅酸盐风化-气候反馈的强度来控制（Walker *et al.*，1981；Brady，1991；Caves *et al.*，2016；Lee *et al.*，2019）。

在长期碳循环中，外生系统中的碳输入主要来源于大陆裂谷、大洋中脊、俯冲带火山弧和大型火成岩省的脱气作用（Berner，1991；Lee *et al.*，2019；Wong *et al.*，2019）。对现代全球火山碳通量的监测显示，岩浆喷发以及火山周边区域的扩散脱气（diffuse emission）至少带来了 60～140Tg C/yr（Tg C/yr，百万吨碳/年）的碳输入。其中大陆裂谷为 10～90Tg C/yr，火山弧（包括大陆弧和洋内弧）为 18～43Tg C/yr，大洋中脊为 8～42Tg C/yr，地幔柱为 3～9Tg C/yr（图 1）（Dasgupta and Hirschmann，2010；Kelemen and Manning，2015；Wong *et al.*，2019）。数据显示，这些构造活动带的地质过程在建立长期碳循环和气候基线上发挥了关键性的作用。然而，目前对于构造活动带如何调节全球碳输入和碳消耗仍无共识，这一问题也是长期碳循环研究的热点和争论焦点。一方面，由于数据的不完备以及测量上的困难，碳排量的估算存在着极大的不确定性，而且不同构造活动带的脱碳量和相对贡献在地质历史中可能发生显著的变化。另一方面，这些构造活动带的地质过程同时也影响着化学风化-气候反馈强度，而后者又受剥蚀区物质成分和水文条件等更多因素的影响（West *et al.*，2002；Maher and Chamberlain，2014）。

近几年，学者们对于大陆弧在长期气候变化中所起的作用发生了激烈的讨论。一方面，从近 400 百万年以来的记录看，大陆弧的长度、大气 P_{CO_2} 以及主要的温室-冰室气候转换存在着近似的协同变化（图 2），因此部分研究人员提出大陆弧在长期碳循环中所起的主要作用是通过控制全球火山 CO_2 排量来达成对碳循环的驱动作用（“碳源说”）（Lee *et al.*，2013；McKenzie *et al.*，2016；McKenzie and Jiang，2019）。但另一方面，在大陆弧的演化过程中，长期的岩浆活动会引起地壳的增厚和相伴随的其他构造活动，从而导致地表的快速抬升与剥蚀（图 3）（Kimbrough *et al.*，2001；Lee *et al.*，2013；Jiang and Lee，2017）。Gernon *et al.*（2021）研究显示，在过去的 200 百万年间，海水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素的变化可能主要受大陆弧的物源输入控制（图 2），这说明大陆弧活动会增强大陆硅酸盐风化以及大气中 CO_2 的消耗效率（“碳汇说”）。造成这些争议的直接原因是缺乏对大陆弧演化过程中碳通量的详细厘定。本文将以作者最近的研究（Jiang and Lee，2017，2019）为基础，结合其他研究成果，着重讨论大陆弧演化过程中控制碳循环的两个重要过程——岩浆活动和剥蚀作用所带来的 CO_2 排放和消耗的幅度变化和动态联系，以及它们如何最终影响长期碳循环和气候演化。

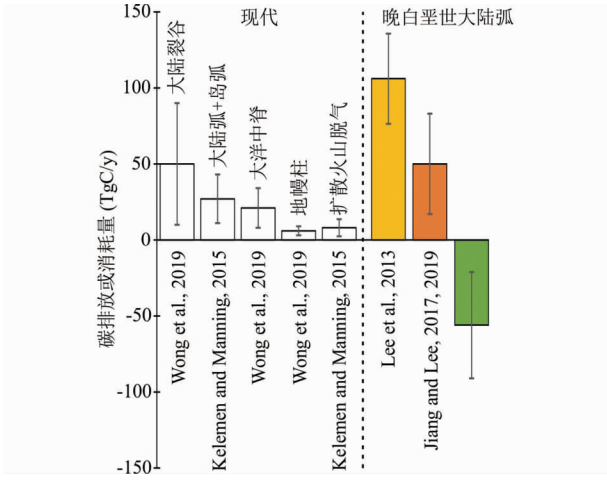

图 1　全球现代主要构造活动带火山脱气排碳量及其与晚白垩世大陆弧碳排放和碳消耗量的对比

其中晚白垩世的大陆弧碳排量（橙色长条柱）和消耗量（绿色长条柱）是基于 Jiang and Lee（2017，2019）中半岛岩基的大陆弧岩浆添加速率和剥蚀速率的均值，结合当时的全球大陆弧长度（Cao *et al.*，2017）计算而来；Tg C = 10^{12} 克碳

Fig. 1　CO_2 sources and fluxes at present time, compared with CO_2 outgassing and consumption from and by continental arcs in Late Cretaceous

The CO_2 outgassing (in orange bar) and consumption rates (in green bar) from Late Cretaceous continental arc were calculated based on the average magmatic addition rate and erosion rate from the Peninsular Ranges batholith from Jiang and Lee (2017, 2019), and the total continental arc length from Cao *et al.*, 2017. Tg C = 10^{12} gram C

1　大陆弧的岩浆爆发（magmatic flare-ups）及碳排放量

大量证据表明，大陆弧岩浆作用在空间或时间上都不是连续的。对北美科迪勒拉弧中生代-早新生代岩浆活动历史的研究表明，大陆弧通常存在以 约 50 百万年为周期的岩浆爆发-间歇期旋回（图 4）。大规模岩浆喷发之后，由于岩浆前锋迁移（magmatic front migration）或地幔楔熔融条件的改变，大陆弧进入岩浆不活跃期（Ducea，2001；Haschke *et al.*，2002；DeCelles *et al.*，2009；Paterson and Ducea，2015；Zhang *et al.*，2021）。之后，由于俯冲作用持续进行，板片俯冲角度的变化可以在近海沟位置产生新的弧岩浆活动，或者由于下地壳-岩石圈地幔拆沉作用，地幔楔熔融增强，亦可开启新一轮

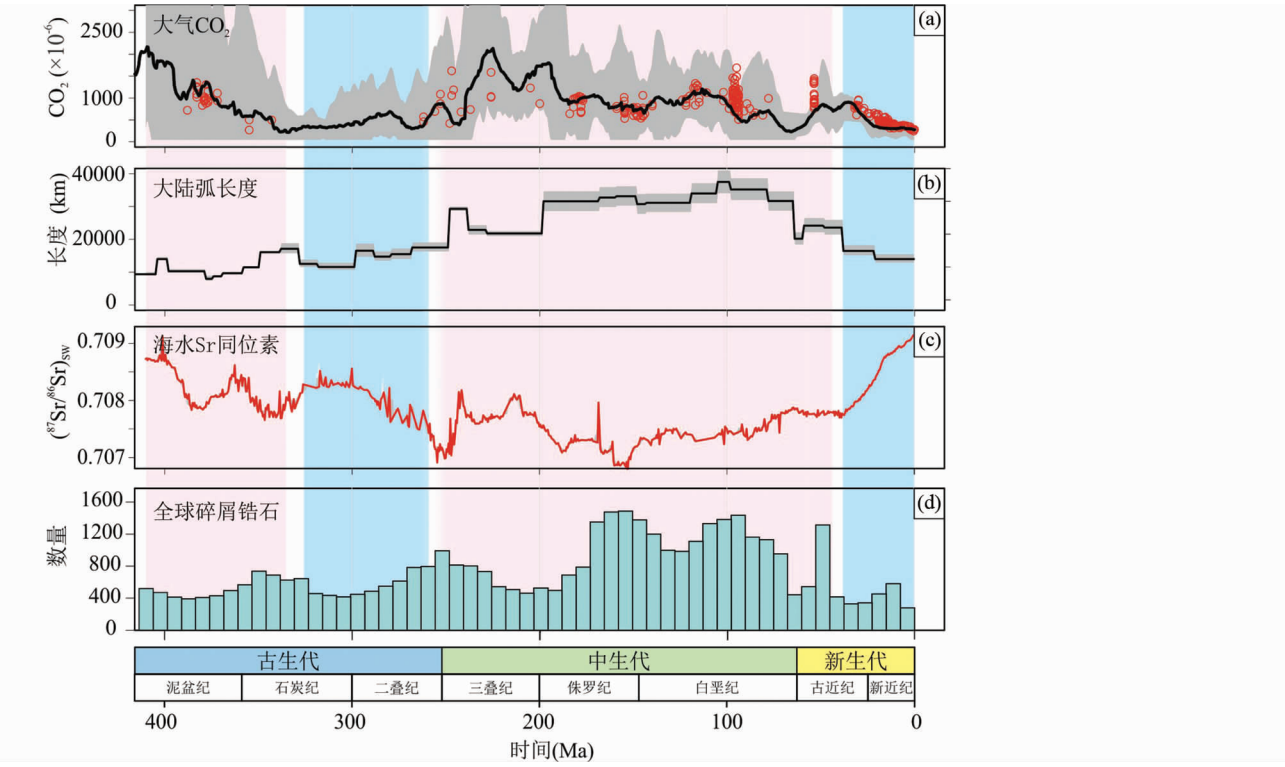

图 2 近 400 百万年间大气 CO_2、全球大陆弧长度、海水 Sr 同位素和碎屑锆石年龄变化趋势(据 Gernon *et al.*, 2021 修改)

图中粉红色和蓝色阴影分别代表主要的全球温室和冰室气候时期;大陆弧长测量来自 Cao *et al.* (2017),大气 CO_2 浓度数据来源于 Foster *et al.* (2017) 和 Witkowski *et al.* (2018),海水 Sr 同位素记录来源于 Veizer *et al.* (1999),全球碎屑锆石年龄来源于 Voice *et al.* (2011)

Fig. 2 Atmospheric CO_2, continental arc length, seawater Sr isotopes, and detrital zircon age changes over the past 400Ma (modified after Gernon *et al.*, 2021)

Red and blue shades highlight the major greenhouse and icehouse climate, respectively. Atmospheric CO_2 concentrations are adapted from Gernon *et al.* (2021), where black line is from multi-proxy (Foster *et al.*, 2017) and red dots are data from phytane-based estimates (Witkowski *et al.*, 2018). Continental arc length measurements are from Cao *et al.* (2017), seawater Sr isotope records from marine carbonates are from Veizer *et al.* (1999), histograms of global detrital zircon ages are from Voice *et al.* (2011)

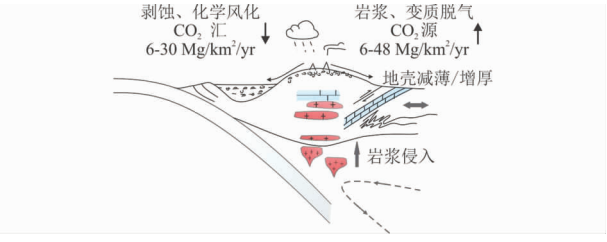

图 3 大陆弧演化过程中的岩浆作用和剥蚀作用及其所引起的碳排放和碳消耗示意图

碳通量值来自于 Jiang and Lee (2019); Mg C = 10^6 克碳

Fig. 3 Schematic diagram showing major processes during development of continental arcs

Carbon flux values are from estimates from the Late Cretaceous-Early Eocene Peninsular Ranges; Batholith from the North American Cordilleran Arc from Jiang and Lee (2019). Mg C = 10^6 gram C

的岩浆大爆发(Ducea and Barton, 2007; DeCelles *et al.*, 2009)。根据前人对北美科迪勒拉陆弧裸露岩体的面积统计和地质年代学的研究,假设地壳厚度为 30km,在岩浆爆发期间,岩浆添加速率(magmatic addition rate,即单位面积的大陆弧,每百万年增加的岩浆体积量)可达 0.5 ~ 1.5$km^3/km^2/Myr$(图 4)(DeCelles *et al.*, 2009; Paterson and Ducea, 2015; Jiang and Lee, 2017; Ratschbacher *et al.*, 2019)。巨量的岩浆在侵入地壳的过程中传递大量的热量,进而影响整个大陆弧造山带的构造演化和碳收支。长时间、旋回式岩浆爆发是大陆弧区别于岛弧、洋中脊和大陆裂谷等其他构造活动带的显著特征之一。大陆弧岩浆爆发带来的岩浆/变质脱碳量的变化,可能是几十百万年到一百百万年尺度上全球碳排量变化的主要控制因素。在地质历史上,大陆弧的全球总长度也随时间显著变化(图 2b; Lee *et al.*, 2013; Cao *et al.*, 2017)。例如,在过去 200Ma 到 55Ma 之间,由于环太平洋和特提斯俯冲带的发育,大陆弧的总长度是现今的两倍。相比之下,岛弧、大洋中脊和大陆裂谷在该时间段内的变化较小(van der Meer *et al.*, 2014)。

大陆弧岩浆中的 CO_2 有三个主要来源:俯冲的沉积物和碳酸盐化大洋岩石圈中的碳、地幔楔中的背景碳以及大陆地壳中的贮藏的碳(Sano and Williams, 1996; Marty and

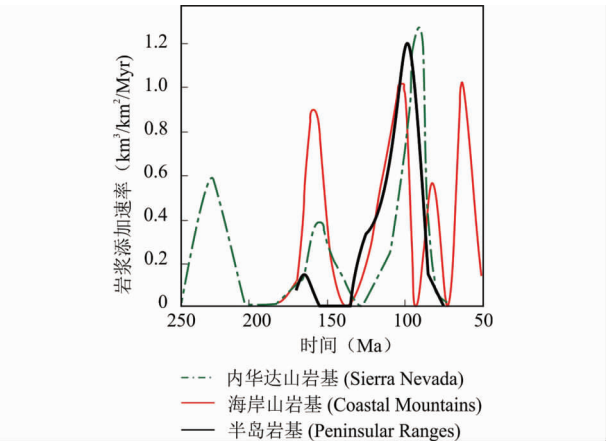

图 4 中生代-早新生代北美科迪勒拉弧的岩浆爆发历史

图中的岩浆添加速率是根据裸露岩基的表面积和年龄分布，假设地壳厚度为 30km，陆弧宽度 100km 计算而来；海岸山脉岩基、内华达山脉岩基和半岛山脉岩基的数据分别来自 DeCelles *et al.* (2009)，Cao and Paterson (2016) 和 Jiang and Lee (2017)

Fig. 4 Magmatic flare-up histories of the North American Cordilleran arc segments

Apparent magmatic addition rates are calculated based on surface area of plutons, with an assumption of 30km crustal thickness and 100km arc width. Data for the Coast Mountains batholith, Sierra Nevada batholith, and Peninsular Ranges batholith are from DeCelles *et al.* (2009), Cao and Paterson (2016) and Jiang and Lee (2017), respectively

Tolstikhin, 1998; Lee and Lackey, 2015)。大陆弧的 CO_2 通量取决于地幔楔、俯冲大洋板片和大陆地壳中的脱碳效率，主要影响因素包括以下几个方面：1）板片俯冲速率。板片俯冲速率会直接影响地幔楔熔融和岩浆上涌的速率，进而影响来自地幔的碳贡献；2）俯冲板片的年龄或热状态。其可能会影响俯冲板片和地幔楔的脱水反应速率以及岩浆中 CO_2 的活度（Ague and Nicolescu, 2014）；3）俯冲的沉积物和大洋岩石圈的碳含量（Sano and Williams, 1996）以及大陆弧岩浆通过的地壳中的碳酸盐岩含量（Johnston *et al.*, 2011; Troll *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013）。

大陆弧的 CO_2 产出通量（$J_{C,arc}$, mol/km²/yr）可根据岩浆的添加速率和岩浆中的 CO_2 含量进行估算（Marty and Tolstikhin, 1998）：

$$J_{C,arc} = \dot{M}_{arc} \cdot \rho_{magma} \cdot [^3He]_{um} \cdot (C/^3He)_{arc} \cdot r_{arc}^{-1} \quad (1)$$

其中 $\dot{M}_{arc}$ 为岩浆的添加速率，或体积通量（km³/km²/Myr），ρ_{magma} 为岩浆密度（2500kg/m³），r_{arc} 为部分熔融程度，$[^3He]_{um}$ 为亏损上地幔中的 ^3He 含量（$(2.5 \pm 1.5) \times 10^{-15}$ mol/g），$(C/^3He)_{arc}$ 为大陆弧火山气体中的 $C/^3He$ 比值。其中，俯冲带岩浆源区的部分熔融程度 r_{arc} 可由岩浆岩中不相容元素含量约束，通常在 10% 和 25% 之间（Marty and Tolstikhin, 1998; Lee *et al.*, 2007; Jiang and Lee, 2019）。公式（1）中引入地幔 He 以及火山气体的 CO_2/He 比值是因为未脱气岩浆中的碳的绝对浓度难以准确测量，但是由于火山气体中的 ^3He 被认为仅来自地幔，因此如果已知地幔的 ^3He 浓度和岩浆平均熔融程度，则可以正向模拟 ^3He 的岩浆通量，进而通过火山气体的 $CO_2/^3He$ 比值来估算由岩浆脱气作用带来的碳通量。

目前大陆弧火山气体的 $CO_2/^3He$ 主要在 $0.7 \times 10^9 \sim 90 \times 10^9$ 之间，平均值为 $(23 \pm 15) \times 10^9$（Sano and Williams, 1996; Mason *et al.*, 2017）。计算可得出原始未脱气大陆弧岩浆中的 CO_2 含量大约是 0.2%，这与实验岩石学和数值模型得出的结果基本相符（Lowenstern, 2001）。大陆弧火山气体 $CO_2/^3He$ 的平均值和偏差远大于洋中脊（$(2.2 \pm 0.7) \times 10^9$）和岛弧（$(17 \pm 10) \times 10^9$），这主要是由于大陆弧岩浆侵入的大陆地壳中碳酸盐岩含量变化造成的。硅酸盐岩浆侵入富碳酸盐岩的大陆地壳，由于矽卡岩化反应可产生更多的 CO_2（Iacono-Marziano *et al.*, 2009; Carter and Dasgupta, 2016, 2018）。

根据平均大陆弧岩浆添加速率和火山气体的 $CO_2/^3He$ 值，以及大陆弧的总长度（Cao *et al.*, 2017）中，可推算出，晚白垩-早始新世温室时期全球大陆弧的平均 CO_2 产量为 50 ± 33Tg C/yr（图 1），超过现今全球俯冲带（大陆弧 + 岛弧）CO_2 产量的总和。由于古老系统中的岩浆添加速率和火山气体中的 $CO_2/^3He$ 比值具有很大的不确定性，尤其是火山气体中的 $CO_2/^3He$ 比值可能会随俯冲沉积物、大洋岩石圈、地壳中的碳含量变化（Johnston *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013），这里估算的 CO_2 产量可能仅为下限。另外，白垩纪-早始新世时期大陆弧岩浆通过碳酸盐台地的概率也可能更大（Lee *et al.*, 2013）。假设白垩纪-古近纪时期与富含碳酸盐岩的陆壳相交的大陆弧长度增加 ~25%，原始未脱气弧岩浆中的 CO_2 浓度为 0.3% ~0.5%，大陆弧的 CO_2 产量可达到现今大陆弧产量的 3.1 ~4.6 倍（Lee *et al.*, 2013）。此外，岩浆活动区的接触变质作用以及火山气体扩散排放也可带来可观的碳排量，至少可达大陆弧 CO_2 总排放量的 10%（Becker *et al.*, 2008; Kelemen and Manning, 2015; Chu *et al.*, 2019; Werner *et al.*, 2019; Wong *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2020）。这些碳排放量在晚白垩世-早始新世时期也会同比增加。

2 大陆弧的岩浆造山作用和岩浆-剥蚀作用的耦合性

全球大陆弧通过旋回式的岩浆爆发向大气中输入大量 CO_2，驱动长期温室效应。然而，在研究大陆弧对长期碳循环的整体贡献时，还必须考虑由剥蚀作用驱动的化学风化-气候负反馈的影响。

对古老大陆弧的研究显示，大陆弧邻近沉积盆地中碎屑锆石的年龄累积曲线和大陆弧岩基中的岩浆锆石记录相似（图 5b），这表明大陆弧的岩浆作用与弧本身的剥蚀作用存在耦合联系（Kimbrough *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2015; Paterson and Ducea, 2015; Jiang and Lee, 2017）。Jiang and Lee (2017) 对美国加利福尼亚州南部的半岛岩基（Peninsular Ranges

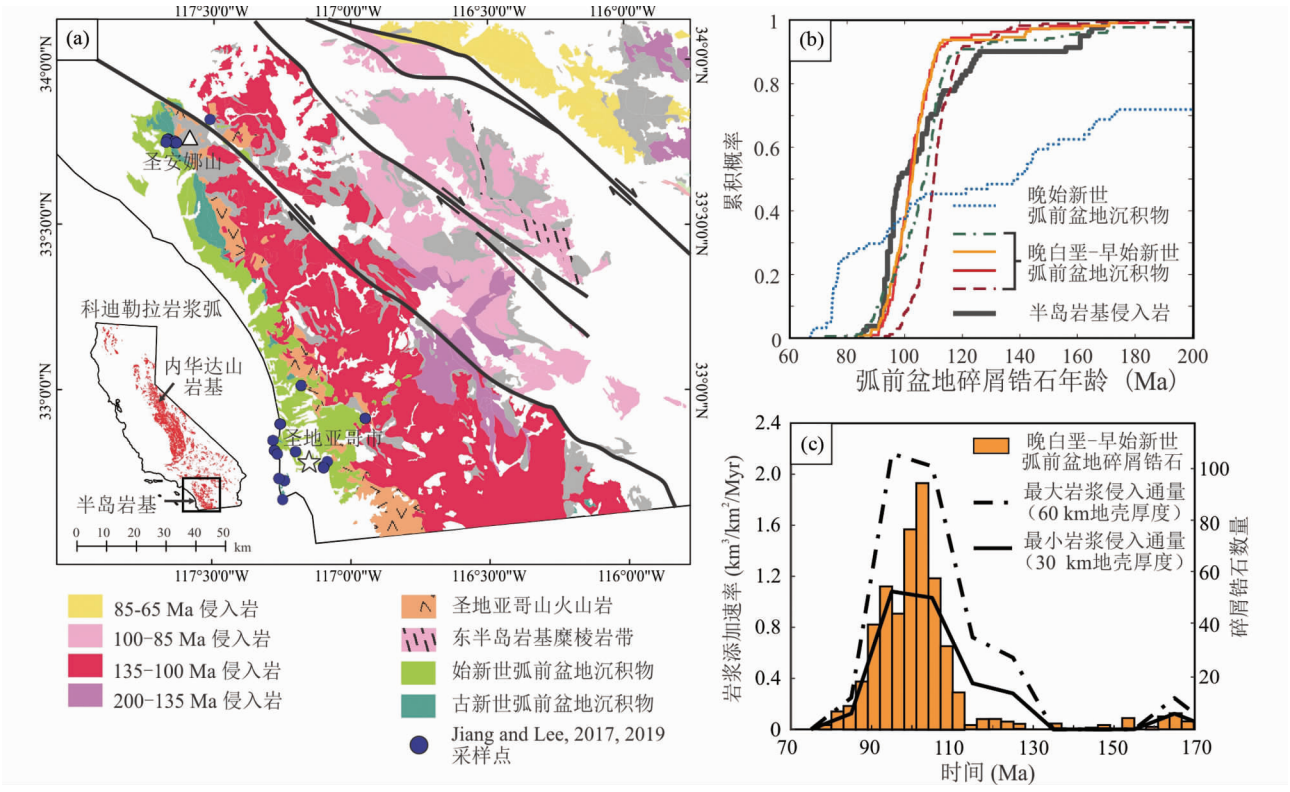

图 5 美国加利福尼亚州半岛岩基及其相关弧前盆地沉积物地质背景(据 Jiang and Lee, 2017, 2019 修改)

(a)美国加利福尼亚州半岛岩基及相关弧前盆地地质图;(b)半岛岩基岩浆岩锆石和弧前盆地锆石 U-Pb 年龄直方图和累积概率图;(c)根据半岛岩基早侏罗-晚白垩世期间岩浆岩出露面积和锆石年龄分布、假设地壳厚度为 30 ~ 60km 计算而来岩浆添加速率

Fig. 5 Geological setting for the Peninsular Ranges batholith and the associated forearc basin in southern California, USA (details see Jiang and Lee, 2017, 2019)

(a) geological map for the Cretaceous Peninsular Ranges batholith and associated Late Cretaceous-Early Eocene forearc basin; (b) histogram and cumulative probability plots for zircon U-Pb ages for the plutons and the forearc strata, showing the example of overlapping between the records of arc-related sedimentary detrital zircons and plutonic magmatic zircons in continental arcs; (c) regional magmatic addition rates estimated through areal distribution of plutons with different ages, and assuming 30 ~ 60km arc crustal thickness

Batholith)及弧前盆地的研究详细阐述了岩浆-剥蚀作用之间的耦合关系(图 5)。半岛岩基为北美科迪勒拉弧的一部分,形成于侏罗-白垩纪时期 Farallon 大洋板块向北美陆壳的俯冲过程。半岛岩基以长英质岩体为主,主要的岩浆爆发期在 125 ~ 75Ma 之间,峰期为 100 ~ 90Ma(图 5c)。晚白垩世-早始新世时期该地区经历了快速剥蚀,在弧前盆地中沉积了大量来自于半岛岩基侵入岩的碎屑物质(Schoellhamer *et al.*, 1981; Girty, 1987; Sharman *et al.*, 2015; Jiang and Lee, 2017)。由于弧前盆地沉积物为侵入岩岩基的主要剥蚀产物,半岛岩基的剥蚀速率可利用弧前盆地地层的沉积时间、碎屑锆石年龄和碎屑角闪石铝压力计推算得出。Jiang and Lee (2017)的研究表明,晚白垩世期间,剥蚀速率与岩浆添加速率处于同一数量级,约为 0.1 ~ 2km^3/km^2/Myr(或 km/Myr)(图 6)。

弧岩浆作用导致的地表抬升可能是大陆弧快速剥蚀的直接原因。目前地球上一些高海拔的山区来自于残留的古代大陆岩浆弧(如北美的阿帕拉契亚山脉,科迪勒拉山脉等)。此外,根据对现代大陆弧的火山观测,火山地区在岩浆输入的同时经常发生强烈的地表隆升,反映岩浆添加导致的地壳增厚(Fialko and Paearse, 2012; Ward *et al.*, 2014)。假设大陆弧地壳厚度主要受岩浆添加和剥蚀减薄控制,在半岛岩基的案例中,根据其在晚白垩世-早始新世期间的岩浆添加速率与剥蚀速率,结合质量守恒和地壳均衡数值模型,可推断岩浆爆发高峰期后 10Myr 内,地壳整体增厚超过 30km,海拔增加可达 5km(图 6; Jiang and Lee, 2017)。这种强烈的地壳增厚和地表隆升驱动了整个大陆弧地区的快速剥蚀作用,岩浆作用峰期后 3 ~ 6Myr 即达到剥蚀作用的峰期,剥蚀速率高达 1 ~ 2km/Myr。在岩浆爆发期之后,由于大陆弧仍处于较高海拔状态,剥蚀速率得以在岩浆间歇期内维持在 0.1 ~ 1km/Myr,直至将由岩浆造山作用形成的"过剩高度"完全去除(图 6)。

3 大陆弧的硅酸盐风化和 CO_2 消耗

大陆弧演化过程中快速且长期的剥蚀作用可提供大量的新鲜硅酸盐碎屑,这些物质在剥蚀、搬运、和沉积过程中可

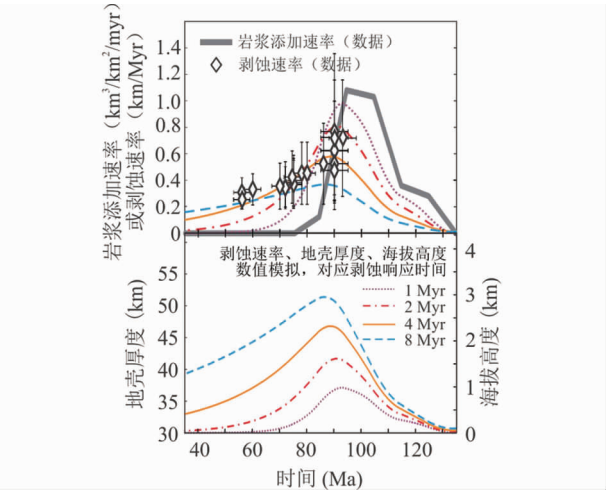

图 6 半岛岩基晚白垩世-早始新世岩浆添加速率、剥蚀速率、地壳厚度和海拔高度演化历史

菱形符号为基于半岛岩基弧前盆地中碎屑锆石 U-Pb 年龄和角闪石铝温压计数据的计算获得的剥蚀速率结果，误差为 1σ；彩色曲线为质量平衡和地壳均衡模型模拟结果．该模型假设大陆弧地壳厚度主要由岩浆添加和剥蚀速率控制，其中剥蚀速率与地表隆升正相关．图中的剥蚀响应时间代表给定地形梯度（或高程）下，可达到最高剥蚀效率的特征时间．计算详情见 Jiang and Lee（2017）

Fig. 6 Data and mass balance and isostatic model results for instantaneous erosion rates, excess crustal thickness, and elevation evolution in the Peninsular Ranges batholith continental arc

Erosion rate represented by the diamond symbols were determined from detrital zircon U-Pb ages and Al-in-hornblende thermobarometers. Error bars in erosion rates and depositional age are in 1σ. Erosion rate, crustal thickness, and elevation represented by colored curves were determined from a mass-balance isostacy model, which assuming the crustal thickness evolution is controlled by the competition between magmatic addition and erosion. The erosion response time is a characteristic parameter representing how easily it will erode in response to large scale topographic gradients. In this case, the erosion response time also represents the time to achieve peak erosion as a response to the crustal thickness and elevation increase resulted from magmatic addition. Details in calculation can be found in Jiang and Lee (2017)

进行化学风化反应并消耗 CO_2。在地质时间尺度上，大气中 CO_2 的消耗主要受钙-镁硅酸盐岩的化学风化和沉积反应控制（Berner，1992；Gaillardet *et al.*，1999）：

$$2CO_2 + 3H_2O + CaSiO_3 \rightarrow H_4SiO_4 + Ca^{2+} + 2HCO_3^- \quad (2)$$

$$2HCO_3^- + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O \quad (3)$$

上述反应式中的 Ca 可替换为 Mg。钙-镁硅酸盐经历化学风化时，每释放 1mol 的 Ca 或 Mg 离子，将从大气中消耗 2 mol 的 CO_2。随后，Ca、Mg 离子在海洋中沉积为碳酸盐岩，这一过程将会有 1mol 的 CO_2 被释放回海洋-大气系统（Holland，1984；Brady，1991；Gaillardet *et al.*，1999）。虽然钠-钾硅酸盐也参与化学风化，但它们主要参与的是海水中的逆风化反应（reverse weathering）。逆风化反应通过生成自生粘土来封存溶解的 Na、K 离子和 SiO_2，并将 HCO_3^- 转化为 CO_2 返回大气。该反应在前寒武纪对硅酸盐风化的元素通量贡献较大，但在显生宙海洋环境中的化学反应过程极为缓慢。因此与钙-镁硅酸盐矿物相比，钠-钾硅酸盐化学风化对大气 CO_2 的影响要小得多（Berner *et al.*，1983；Gaillardet *et al.*，1999；Isson and Planavsky，2018）。碳酸盐岩风化也消耗 CO_2，但 Ca 离子进入海洋中生成碳酸盐沉积物的过程会释放出等量的 CO_2，故而不影响大气 CO_2 浓度（Berner *et al.*，1983；Brady，1991）。因此，对于长期碳循环的净化学风化反应，每从陆地岩石中释放 1 mol 的 Ca^{2+} 或 Mg^{2+}，将从大气中消耗 1mol 的 CO_2。

在现代系统中，化学风化通量通常可利用河流溶解载荷来估算（Gaillardet *et al.*，1999；West *et al.*，2005），但这种方法不适用于古代系统。对于古代大陆弧系统，由于邻近盆地中的沉积物主要来自岩浆弧，弧岩浆岩与盆地中沉积物之间的化学成分差异可以近似代表大陆弧物质经历风化、剥蚀、搬运和沉积过程的整体化学风化总和。这期间的化学风化通量，即单位时间，单位面积内陆表硅酸盐岩化学剥蚀量，可由剥蚀速率和 Ca、Mg 的损耗/流失比例计算得出，该化学风化通量可最终根据化学式（2）和（3）换算为大陆弧在剥蚀阶段的 CO_2 消耗通量（Riebe *et al.*，2004；Jiang and Lee，2019）。以晚白垩世-早始新世的半岛岩基为例，弧前盆地沉积物相较于侵入岩母岩的全岩地球化学组成，Ca 损耗了 50% ~ 90%（图 7a），表明这段时期的大陆弧剥蚀伴随着较高化学风化强度（Jiang and Lee，2019）。结合剥蚀速率，半岛岩基自晚白垩世至始新世早期的 Ca 风化通量，或 CO_2 消耗率为 $(0.5 \sim 2.2) \times 10^6 mol/km^2/yr$（图 7b、图 8a）。由于总剥蚀速率对化学风化通量起着主要的控制作用，同时由于上文所述的大陆弧岩浆-剥蚀作用的耦合性，大陆弧化学风化（或 CO_2 消耗）的峰期发生在岩浆活动高峰后的 10Myr 内（图 8a）。假设半岛岩基中的平均 CO_2 消耗通量可以代表晚白垩世大陆弧，则全球总硅酸盐风化量（或 CO_2 消耗量）大约为 56 ± 35Tg C/yr，这个数值大致等于同时代大陆弧的 CO_2 释放量（图 1）。

值得注意的是，同时代不同大陆弧的岩浆生产速率和风化剥蚀速率可能由于俯冲动力学、俯冲带岩性和所处气候带的不同而存在差异性，基于半岛岩基的大陆弧 CO_2 消耗通量估算可能仅为下限。该研究中估算的硅酸盐风化通量仅代表晚白垩世至早始新世期间半岛岩基中的花岗岩风化相关通量。目前出露的科迪勒拉大陆弧，以及侏罗纪-早白垩世期间的相关沉积物的成分分析表明，大陆弧岩浆在演化早期以中基性、富镁铁质成分为主（Lee *et al.*，2007；Kimbrough *et al.*，2014；Morton *et al.*，2014）。而且早期的大陆弧岩石，连同上覆的火山地层，可能在岩浆峰期之前就已经被移除了。在给定的剥蚀速率和气候条件下，玄武岩和火山岩的硅酸盐化学风化通量要比花岗岩高出一个数量级（Louvat and

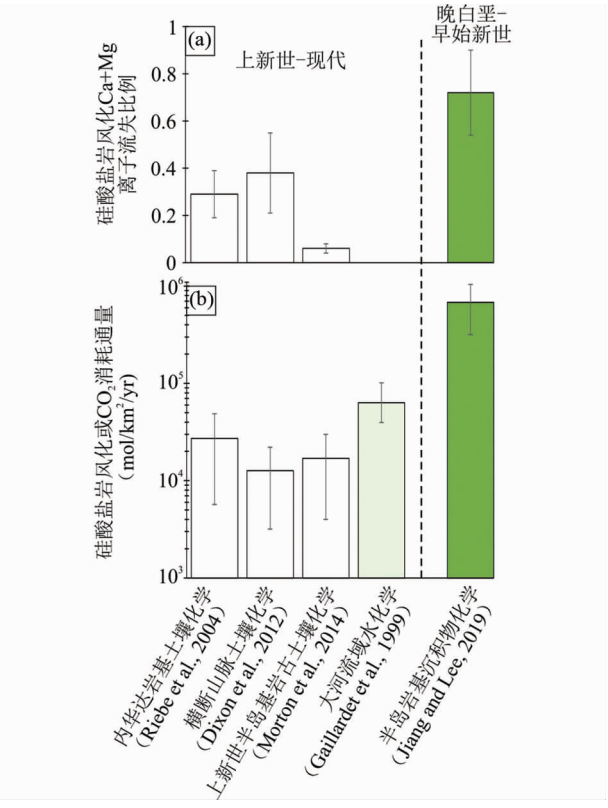

图 7 晚白垩-早始新世半岛岩基在风化剥蚀过程中 Ca、Mg 离子的流失比例和硅酸盐风化通量(或 CO_2 消耗通量)以及与上新世-现代北美科迪勒拉弧以及现代全球大陆风化相关数据的对比

晚白垩-早始新世半岛岩基的数据来自于弧前盆地沉积物的全岩地球化学(Jiang and Lee,2019),上新世-现代的数据来自于研究者(Gaillardet *et al.*,1999; Riebe *et al.*,2004; Dixon *et al.*,2012; Girty *et al.*,2014)对土壤、风化层剖面的土壤地球化学,以及大河流域的水化学测量

Fig. 7 Chemical depletion fraction of Ca + Mg and silicate weathering flux (in CO_2 equivalent) in the Late Cretaceous-Early Eocene Peninsular Ranges batholith (Jiang and Lee, 2019), compared to Pliocene-modern quantities

The Pliocene-modern silicate weathering flux from Cordilerran arc were determined from soil and regolith profile measurements from Riebe *et al.* (2004) (Sierra Nevada), Dixon *et al.* (2012) (Transverse Ranges), and Girty *et al.* (2014) (PRB). Modern global silicate weathering fluxes determined from river geochemistry are from Gaillardet *et al.* (1999)

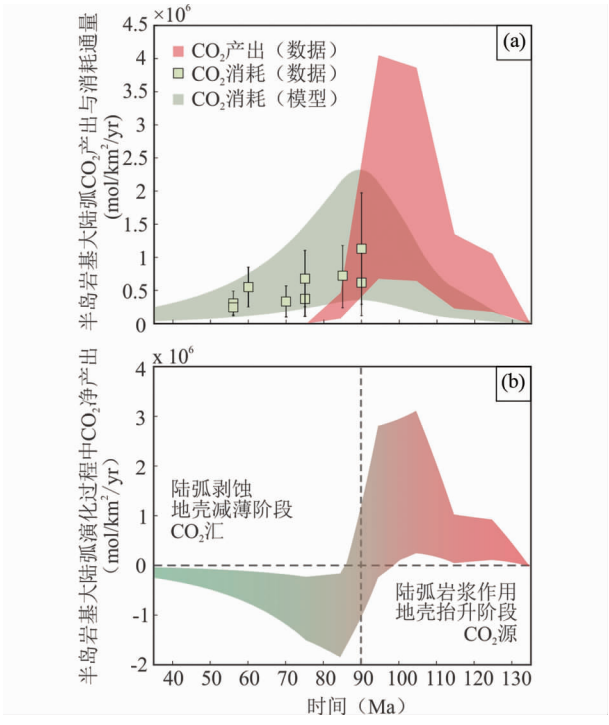

图 8 半岛岩基中 CO_2 生产和消耗通量(a)以及净 CO_2 通量(b)随时间的变化(据 Jiang and Lee,2019 修改)

图 8a 中 CO_2 生产通量是基于半岛岩基岩浆添加速率和公式(1)计算而来,CO_2 消耗通量是基于半岛岩基晚白垩-早始新世期间岩基的剥蚀速率(图 6)和 Ca + Mg 离子化学风化流失率(图 7)计算而来;图 8b 的净 CO_2 通量为图 8a 中 CO_2 生产和消耗通量相减得出. 半岛岩基大陆弧在岩浆爆发期间是净 CO_2 源,但在岩浆活动停止后,由于还能维持较高的剥蚀速率,最终成为净 CO_2 汇

Fig. 8 Variation in CO_2 production and consumption (a), and net CO_2 fluxes (b) in the Cretaceous- Eocene Peninsular Ranges continental arc (modified after Jiang and Lee, 2019)

The CO_2 production fluxes were calculated using the magmatic addition rates from Fig. 6 and Eq. 1. The CO_2 consumption fluxes were calculated using the erosion rates from Fig. 6 and chemical depletion fraction in Ca and Mg from Fig. 7. Net CO_2 fluxes in Fig. 8b was calculated from subtraction of the production curve by the consumption curve in Fig. 8a. The arc was a net CO_2 source during the Late Cretaceous magmatic flare-up, but became a net CO_2 sink due to prolonged erosion after the cessation of magmatism

Allègre,1997; Gaillardet *et al.*,1999; Lee *et al.*,2018)。因此,尽管大陆弧在岩浆爆发之前的剥蚀速率较低,但实际的硅酸盐化学风化通量和 CO_2 消耗可能不低于此处的估算。

4 大陆弧:碳源还是碳汇?

4.1 单个大陆弧生命周期中的碳收支"平衡"

针对单个大陆弧(如半岛岩基)的研究表明,由于岩浆和剥蚀过程的相互作用,大陆弧的净碳收支在整个大陆弧演化的过程中随时间变化。在岩浆爆发阶段,岩浆脱气作用占主导,大陆弧为净碳源区。但同时,岩浆爆发期间,大量的岩浆侵入导致地壳增厚和地表隆升。岩浆活动结束后,残余的地貌致使剥蚀作用和化学风化作用得以长期进行,在这一阶段大陆弧转变为净碳汇区。因此,大陆弧作为净碳源还是碳汇取决于大陆弧所处的演化阶段,但从大陆弧的整个生命周期看,岩浆作用释放的 CO_2 量与由硅酸盐化学风化消耗的 CO_2

量大致平衡。尽管计算得出的 CO_2 产出和消耗通量误差较大，但对于同一个岩浆爆发周期（约 50Myr），大陆弧 CO_2 生产和消耗通量处于同一数量级，均为 $10^6 mol/km^2/yr$（图 8b）。

4.2 大陆弧演化对全球硅酸盐风化-气候反馈强度的影响

虽然 Jiang and Lee（2017，2019）对于半岛岩基的案例研究仅展示了区域尺度上大陆弧长期碳收支的演变，但该研究中阐明的大陆弧中岩浆作用与剥蚀过程之间的耦合关系在一定程度上揭示了大陆弧演化对全球硅酸盐风化-气候反馈强度的影响。

图 7 总结了北美科迪勒拉大陆弧自晚白垩世以来 Ca、Mg 离子化学风化损耗率和化学风化通量（或 CO_2 消耗量）的演变趋势。现代科迪勒拉弧的平均硅酸盐风化通量大约为 $(0.01 \sim 3) \times 10^5 mol/km^2/yr$，现代全球平均 Ca + Mg 风化通量约为 $0.6 \times 10^5 mol/km^2/yr$（Gaillardet *et al.*，1999；Riebe *et al.*，2004；West *et al.*，2005），均低于晚白垩-早始新世科迪勒拉弧的相关数值（$10^6 mol/km^2/yr$）。同时，晚白垩世弧前盆地沉积物所显示的化学风化损耗比率远高于现代科迪勒拉弧或全球平均值。这可能是由于晚白垩世较高的 P_{CO_2} 和温度条件导致了较高的硅酸盐化学风化反应强度（或效率）。这反映了大陆弧岩浆造山带演化过程中化学风化和气候之间的相互作用。

与相对平坦的大陆内部相比，地势较高的造山带由于快速剥蚀持续的带来新鲜的碎屑物质，同时考虑山体地形效应对水文条件的影响，后者的化学风化对气候变化更为敏感（West *et al.*，2005；Hilley *et al.*，2010；Maher and Chamberlain，2014；Caves *et al.*，2016）。大陆弧岩浆爆发所释放的 CO_2 带来了温室效应，有助于进一步增强陆表化学风化反应动力（或化学风化强度；Walker *et al.*，1981；Kump *et al.*，2000），由此提升全球风化-气候反馈强度和 CO_2 消耗效率。在大陆弧演化末期，岩浆活动减弱、排入大气的 CO_2 减少、地表隆升效应也衰退，剥蚀速率与化学风化反应效率也随之降低，最终全球气候反馈强度将恢复到原始水平。因此，尽管造山带，尤其是大陆弧造山带占全球陆地面积比例较小（当前为 10% ；Tanner，1962）），但其分布与长度变化可能对全球化学风化-气候反馈强度带来长远的影响。

由大陆弧演化驱动的 CO_2 排放以及化学风化-气候反馈强度的变化对全球气候可起到一定程度的“缓冲”作用，防止极端气候的产生。图 9 为假设其他构造活动带 CO_2 产出恒定，改变大陆弧长度可带来的全球 CO_2 产量（或消耗）和大气-海洋 P_{CO_2} 变化的半定量化示意图。大陆弧长度增加，或较强烈的全球大陆弧活动可提高全球 CO_2 产出和大气-海洋中的 CO_2 浓度，同时提高化学风化-气候反馈强度。虽然大陆弧向海洋-大气系统贡献了大量的 CO_2，但由于大陆弧造山带的发展同时增强了剥蚀量和陆表化学风化强度，与没有反馈强度变化的系统相比，最终 P_{CO_2} 可以稳定在相对合理的

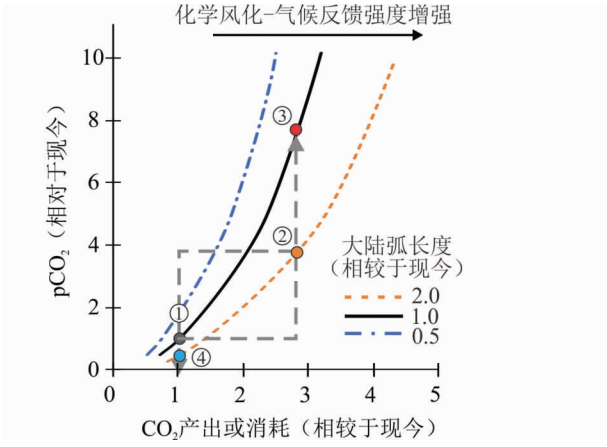

图 9 大陆弧演化对全球碳循环的影响的半定量化示意图（据 Jiang and Lee，2019 修改）

地球海洋-大气系统中的长期 P_{CO_2} 变化取决于地质 CO_2 产量和硅酸盐风化-气候反馈强度；大陆弧活动在带来大量岩浆 CO_2 脱气的同时，也因为岩浆造山作用提高了全球剥蚀效率，进而增强了陆表化学风化反应性，提高化学风化-气候反馈强度，由此维系地球环境的宜居性．点 1-点 4 代表遵循不同假设构造演化路径（虚线）的条件（详情参见正文）

Fig. 9 Semi-quantitative diagram showing different stabilized P_{CO_2} levels depending on CO_2 production and silicate weathering-climate feedback strength (modified after Jiang and Lee, 2019)

Increase in global continental arc activity (length) results in higher global CO_2 production and potentially a higher P_{CO_2} condition. The increase in mountainous area resulted from enhanced continental arc activity (or length) results in increase in global weatherability, thus increases the silicate weathering-climate feedback strength. In this way the development of continental arc sustains long-term climate stability. Point 1-Ponit 4 represents conditions following different hypothetical tectonic evolution paths (dashed lines) (details see text)

水平，而非被推向极端温室气候（点 1 到 2 对比 1 到 3；图 9）。同理，当大陆弧岩浆 CO_2 产量减少时，风化-气候反馈强度也随之降低，CO_2 消耗逐渐减缓，阻止系统进入极端冰室气候（点 2 到 1 对比 2 到 4；图 9）。

5 结语

本文总结了大陆弧演化过程中岩浆作用和剥蚀作用之间的相互关系以及相关的碳通量，并简要阐述了大陆弧演化对全球长期碳循环的影响。大陆弧因其长时间、旋回式岩浆爆发特征，相较于其他构造活动带（如岛弧、洋中脊、大陆裂谷等），在 50 ~ 100Myr 时间尺度上对全球碳通量的变化起到了重要的贡献。区域尺度来看，大陆弧的平均碳排放和消耗通量在大陆弧的整个生命周期中基本一致，其在碳循环中所起的贡献（净碳源或净碳汇）取决于其演化的不同阶段。全

球尺度来看,大陆弧岩浆爆发期在增加了全球 CO_2 产量的同时,也导致了强烈的造山作用和快速剥蚀,增强了 CO_2 消耗。增强的 CO_2 产量带来的较高 P_{CO_2} 条件又提高了陆表化学风化强度,以此影响全球风化-气候反馈强度。因此大陆弧扮演着一个可自我调节的"地质空调"的角色,在驱动全球气候变化的同时维系地球环境的宜居性。由于构造重构导致的地质历史中大陆弧长度的变化可能在调节长期 P_{CO_2} 中起到了重要作用。例如,当大陆弧较长时,CO_2 排量较高,但由于同时增强了风化-气候反馈强度,P_{CO_2} 和气候可以被维系在合理的水平,而非极端气候。

在大陆弧与长期碳循环的研究中,还有许多问题亟待解决,比如如何有效厘定大陆弧演化过程中各种地质过程相关的碳通量,大陆地壳和俯冲洋壳的成分以及热状态如何影响岩浆/变质脱碳效率,大陆弧/造山带在气候带上的差异分布将如何影响剥蚀和化学风化,如何具体量化化学风化-气候反馈强度,大陆弧与其他构造活动带过程(大洋中脊、岛弧、大陆裂谷、地幔柱等)在长期碳循环中一些重要地质历史节点上的差异贡献,等等。

致谢 感谢美国莱斯大学的 Cin-Ty Lee 和 Rajdeep Dasgupta 教授对半岛岩基研究的指导;感谢两位审稿人提出的宝贵修改意见。

References

Ague JJ and Nicolescu S. 2014. Carbon dioxide released from subduction zones by fluid-mediated reactions. Nature Geoscience, 7(5): 355 – 360

Becker JA, Bickle MJ, Galy A and Holland TJB. 2008. Himalayan metamorphic CO_2 fluxes: Quantitative constraints from hydrothermal springs. Earth and Planetary Science Letters, 265(3 – 4): 616 – 629

Berner RA, Lasaga AC and Garrels RM. 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. American Journal of Science, 283(7): 641 – 683

Berner RA. 1991. A model for atmospheric CO_2 over Phanerozoic time. American Journal of Science, 291(4): 339 – 376

Berner RA. 1992. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(8): 3225 – 3231

Brady PV. 1991. The effect of silicate weathering on global temperature and atmospheric CO_2. Journal of Geophysical Research, 96(B11): 18101 – 18106

Cao WR and Paterson S. 2016. A mass balance and isostasy model: Exploring the interplay between magmatism, deformation and surface erosion in continental arcs using central Sierra Nevada as a case study. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17(6): 2194 – 2212

Cao WR, Lee CTA and Lackey JS. 2017. Episodic nature of continental arc activity since 750Ma: A global compilation. Earth and Planetary Science Letters, 461: 85 – 95

Carter LB and Dasgupta R. 2016. Effect of melt composition on crustal carbonate assimilation: Implications for the transition from calcite consumption to skarnification and associated CO_2 degassing. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17(10): 3893 – 3916

Carter LB and Dasgupta R. 2018. Decarbonation in the Ca-Mg-Fe carbonate system at mid-crustal pressure as a function of temperature and assimilation with arc magmas: Implications for long-term climate. Chemical Geology, 492: 30 – 48

Caves JK, Jost AB, Lau KV and Maher K. 2016. Cenozoic carbon cycle imbalances and a variable weathering feedback. Earth and Planetary Science Letters, 450: 152 – 163

Chu X, Lee CTA, Dasgupta R and Cao WR. 2019. The contribution to exogenic CO_2 by contact metamorphism at continental arcs: A coupled model of fluid flux and metamorphic decarbonation. American Journal of Science, 319(8): 631 – 657

Dasgupta R and Hirschmann MM. 2010. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior. Earth and Planetary Science Letters, 298(1 – 2): 1 – 13

DeCelles PG, Ducea MN, Kapp P and Zandt G. 2009. Cyclicity in Cordilleran orogenic systems. Nature Geoscience, 2(4): 251 – 257

Dixon JL, Hartshorn AS, Heimsath AM, DiBiase RA and Whipple KX. 2012. Chemical weathering response to tectonic forcing: A soils perspective from the San Gabriel Mountains, California. Earth and Planetary Science Letters, 323 – 324: 40 – 49

Ducea M. 2001. The California arc: Thick granitic batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups. GSA Today, 11(11): 4 – 10

Ducea MN and Barton MD. 2007. Igniting flare-up events in Cordilleran arcs. Geology, 35(11): 1047 – 1050

Fialko Y and Pearse J. 2012. Sombrero uplift above the Altiplano-Puna magma body: Evidence of a ballooning mid-crustal diapir. Science, 338(6104): 250 – 252

Foster GL, Royer DL and Lunt DJ. 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. Nature Communications, 8: 14845

Gaillardet J, Dupré B, Louvat P and Allègre CJ. 1999. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chemical Geology, 159(1 – 4): 3 – 30

Gernon TM, Hincks TK, Merdith AS, Rohling EJ, Palmer MR, Foster GL, Bataille CP and Müller RD. 2021. Global chemical weathering dominated by continental arcs since the Mid-Palaeozoic. Nature Geoscience, 14: 690 – 696

Girty GH. 1987. Sandstone provenance, Point Loma Formation, San Diego, California: Evidence for uplift of the Peninsular Ranges during the Laramide Orogeny. Journal of Sedimentary Petrology, 57(5): 839 – 844

Girty GH, Gebhart KL, Replogle CT, Morton N, Purcell JW, Parizek JR, Carrasco T, Errthum R and Groover K. 2014. Reconstructing the regolith from erosionally exhumed corestone and saprock derived from the Cretaceous Val Verde tonalite, Peninsular Ranges, southern California, USA: A case study. Catena, 113: 150 – 164

Haschke MR, Scheuber E, Günther A and Reutter KJ. 2002. Evolutionary cycles during the Andean orogeny: Repeated slab breakoff and flat subduction? Terra Nova, 14(1): 49 – 55

Hilley GE, Chamberlain CP, Moon S, Porder S and Willett SD. 2010. Competition between erosion and reaction kinetics in controlling silicate-weathering rates. Earth and Planetary Science Letters, 293(1 – 2): 191 – 199

Holland HD. 1984. The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans. Princeton: Princeton University Press

Iacono-Marziano G, Gaillard F, Scaillet B, Pichavant M and Chiodini G. 2009. Role of non-mantle CO_2 in the dynamics of volcano degassing: The Mount Vesuvius example. Geology, 37(4): 319 – 322

Isson TT and Planavsky NJ. 2018. Reverse weathering as a long-term stabilizer of marine pH and planetary climate. Nature, 560(7719): 471 – 475

Jiang HH and Lee CTA. 2017. Coupled magmatism-erosion in continental arcs: Reconstructing the history of the Cretaceous Peninsular Ranges batholith, southern California through detrital hornblende barometry in forearc sediments. Earth and Planetary Science Letters, 472: 69 – 81

Jiang HH and Lee CTA. 2019. On the role of chemical weathering of continental arcs in long-term climate regulation: A case study of the

Peninsular Ranges batholith, California (USA). Earth and Planetary Science Letters, 525: 115733

Johnston FKB, Turchyn AV and Edmonds M. 2011. Decarbonation efficiency in subduction zones: Implications for warm Cretaceous climates. Earth and Planetary Science Letters, 303(1-2): 143-152

Kelemen PB and Manning CE. 2015. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(30): E3997-E4006

Kimbrough DL, Smith DP, Mahoney JB, Moore TE, Grove M, Gastil RG, Ortega-Rivera A and Fanning CM. 2001. Forearc-basin sedimentary response to rapid Late Cretaceous batholith emplacement in the Peninsular Ranges of southern and Baja California. Geology, 29(6): 491-494

Kimbrough DL, Abbott PL, Balch DC, Bartling SH, Grove M, Mahoney JB, Donohue RF. 2014. Upper Jurassic Peñasquitos Formation: Forearc basin western wall rock of the Peninsular Ranges batholith. In: Morton DM and Miller FK (eds.). Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California. Geological Society of America Memoirs, 211: 625-643

Kump LR, Brantley SL and Arthur MA. 2000. Chemical weathering, atmospheric CO_2, and climate. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 611-667

Lee CTA, Morton DM, Kistler RW and Baird AK. 2007. Petrology and tectonics of Phanerozoic continent formation: From island arcs to accretion and continental arc magmatism. Earth and Planetary Science Letters, 263(3-4): 370-387

Lee CTA, Shen B, Slotnick BS, Liao K, Dickens GR, Yokoyama Y, Lenardic A, Dasgupta R, Jellinek M, Lackey JS, Schneider T and Tice MM. 2013. Continental arc-island arc fluctuations, growth of crustal carbonates, and long-term climate change. Geosphere, 9(1): 21-36

Lee CTA and Lackey JS. 2015. Global continental arc flare-ups and their relation to long-term greenhouse conditions. Elements, 11(2): 125-130

Lee CTA, Thurner S, Paterson S and Cao WR. 2015. The rise and fall of continental arcs: Interplays between magmatism, uplift, weathering, and climate. Earth and Planetary Science Letters, 425: 105-119

Lee CTA, Jiang HH, Ronay E, Minisini D, Stiles J and Neal M. 2018. Volcanic ash as a driver of enhanced organic carbon burial in the Cretaceous. Scientific Reports, 8: 4197

Lee CTA, Jiang HH, Dasgupta R and Torres M. 2019. A framework for understanding whole-earth carbon cycling. In: Orcutt BN, Daniel I and Dasgupta R (eds.). Deep Carbon: Past to Present. Cambridge: Cambridge University Press, 313-357

Louvat P and Allègre CJ. 1997. Present denudation rates on the island of Réunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(17): 3645-3669

Lowenstern JB. 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. Mineralium Deposita, 36(6): 490-502

Maher K and Chamberlain CP. 2014. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle. Science, 343(6178): 1502-1504

Marty B and Tolstikhin IN. 1998. CO_2 fluxes from mid-ocean ridges, arcs and plumes. Chemical Geology, 145(3-4): 233-248

Mason E, Edmonds M and Turchyn AV. 2017. Remobilization of crustal carbon may dominate volcanic arc emissions. Science, 357(6348): 290-294

McKenzie NR, Horton BK, Loomis SE, Stockli DF, Planavsky NJ and Lee CTA. 2016. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability. Science, 352(6284): 444-447

McKenzie NR and Jiang HH. 2019. Earth's outgassing and climatic transitions: The slow burn towards environmental "catastrophes"? Elements, 15(5): 325-330

Morton DM, Miller FK, Kistler RW, Premo WR, Lee CTA, Langenheim VE, Wooden JL, Snee LW, Clausen BL and Cossette P. 2014. Framework and petrogenesis of the northern Peninsular Ranges batholith, southern California. In: Morton DM and Miller FK (eds.). Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California. Geological Society of America Memoirs, 211: 61-143

Paterson SR and Ducea MN. 2015. Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. Elements, 11(2): 91-98

Ramos EJ, Lackey JS, Barnes JD and Fulton AA. 2020. Remnants and rates of metamorphic decarbonation in continental arcs. GSA Today, 30(5): 4-10

Ratschbacher BC, Paterson SR and Fischer TP. 2019. Spatial and depth-dependent variations in magma volume addition and addition rates to continental arcs: Application to global CO_2 fluxes since 750Ma. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(6): 2997-3018

Riebe CS, Kirchner JW and Finkel RC. 2004. Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes. Earth and Planetary Science Letters, 224(3-4): 547-562

Sano Y and Williams SN. 1996. Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. Geophysical Research Letters, 23(20): 2749-2752

Schoellhamer JE. 1981. Geology of the Northern Santa Ana Mountains, California. Washington: United States Department of the Interior, Geological Survey, 109

Sharman GR, Graham SA, Grove M, Kimbrough DL and Wright JE. 2015. Detrital zircon provenance of the Late Cretaceous-Eocene California forearc: Influence of Laramide low-angle subduction on sediment dispersal and paleogeography. GSA Bulletin, 127(1-2): 38-60

Tanner WF. 1962. Components of the hypsometric curve of the Earth. Journal of Geophysical Research, 67(7): 2841-2843

Troll VR, Hilton DR, Jolis EM, Chadwick JP, Blythe LS, Deegan FM, Schwarzkopf LM and Zimmer M. 2012. Crustal CO_2 liberation during the 2006 eruption and earthquake events at Merapi volcano, Indonesia. Geophysical Research Letters, 39(11): L11302

van der Meer DG, Zeebe RE, van Hinsbergen DJJ, Sluijs A, Spakman W and Torsvik TH. 2014. Plate tectonic controls on atmospheric CO_2 levels since the Triassic. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(12): 4380-4385

Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden GAF, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha OG and Strauss H. 1999. $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ evolution of Phanerozoic seawater. Chemical Geology, 161(1-3): 59-88

Voice PJ, Kowalewski M and Eriksson KA. 2011. Quantifying the timing and rate of crustal evolution: Global compilation of radiometrically dated detrital zircon grains. The Journal of Geology, 119(2): 109-126

Walker JCG, Hays PB and Kasting JF. 1981. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. Journal of Geophysical Research, 86(C10): 9776-9782

Ward KM, Zandt G, Beck SL, Christensen DH and McFarlin H. 2014. Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions. Earth and Planetary Science Letters, 404: 43-53

Werner C, Fischer TP, Aiuppa A, Edmonds M, Cardellini C, Carn S, Chiodini G, Cottrell E, Burton M, Shinohara H and Allard P. 2019. Carbon dioxide emissions from subaerial volcanic regions: Two decades in review. In: Orcutt BN, Daniel I and Dasgupta R (eds.). Deep Carbon: Past to Present. Cambridge: Cambridge University Press, 188-236

West AJ, BIckle MJ, Collins R and Brasington J. 2002. Small-catchment perspective on Himalayan weathering fluxes. Geology, 30(4): 355-358

West AJ, Galy A and Bickle M. 2005. Tectonic and climatic controls on silicate weathering. Earth and Planetary Science Letters, 235(1-2): 211-228

Witkowski CR, Weijers JWH, Blais B, Schouten S and Sinninghe Damsté JS. 2018. Molecular fossils from phytoplankton reveal secular P_{CO_2} trend over the phanerozoic. Science Advances, 4(11): eaat4556

Wong K, Mason E, Brune S, East M, Edmonds M and Zahirovic S. 2019. Deep carbon cycling over the past 200 million years: A review of fluxes in different tectonic settings. Frontiers in Earth Science, 7: 263

Zhang ZM, Ding HX, Dong X, Tian ZL, Palin RM, Santosh M, Chen YF, Jiang YY, Qin SK, Kang DY and Li WT. 2021. The Mesozoic magmatic, metamorphic, and tectonic evolution of the eastern Gangdese magmatic arc, southern Tibet. GSA Bulletin, doi: 10.1130/B36134.1