

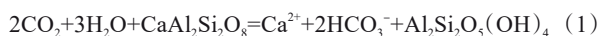
LI Xiangying, WANG Ninglian, DING Yongjian. A new view of mountain erosion and carbon cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1-3. [李向应, 王宁练, 丁永建. 山地侵蚀与碳循环研究的新视角[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1-3.]

山地侵蚀与碳循环研究的新视角

李向应^{1,2}, 王宁练^{1,2}, 丁永建^{3,4,5}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan)

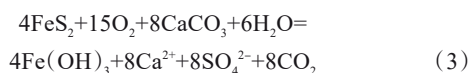
造山运动和地貌形成是板块汇聚或动力抬升后岩石隆升引起的,其伴随着物理侵蚀率增加、岩石暴露和河流泥沙向海洋的转移。物理侵蚀、化学风化与碳循环关系密切,其耦合作用以硅酸盐矿物的风化反应为基础[式(1)]。长期以来,硅酸盐风化被认为是去除大气CO₂、平衡火山活动碳排放的一个关键机制,维持着一个适宜人类居住的星球^[1]。相关研究可以追溯到19世纪,直到20世纪90年代对基岩矿物的化学风化如何响应隆升和侵蚀以及如何影响全球碳循环的定量研究仍然有限。



在过去几十年中,已有的一些研究结果有助于更好地理解侵蚀对硅酸盐风化作用的影响^[2]。基于大量野外监测数据,地球化学动力学和反应传输模型也量化了风化反应速率如何随着矿物暴露和水文控制作用而变化^[3]。因此,目前有机会来量化隆升和侵蚀作用在“增强矿物与大气和水相互作用”方面的全球效应^[4-6]。

Gaillardet等^[7]指出,要了解侵蚀对碳循环的净影响,需要关注硅酸盐风化以外的机制[图1(a)]。在这种观点中,侵蚀既驱动了海洋沉积物中有机碳(OC)的传输和埋藏(CO₂汇)^[8-9],又暴露了风化过程中可被氧化的岩石源OC和矿物(CO₂源)。具体来说,岩石OC(OC_{petro})的氧化作用[式(2)]、耦合硫化物氧化的碳酸盐风化作用^[10][式(3)]都是CO₂源[图1(a)]。此外,山体滑坡等地貌过程也会侵蚀来自植物和土壤的陆地有机质。从全球尺度来看,生物有机碳侵蚀是一个相当大的动态CO₂汇[式(4)、图1(a)]。因此,要深入理解侵蚀在碳循环中的作用,需要考虑碳在岩石和大气之间转移的所有机制,这里

包括CO₂汇(硅酸盐风化、OC埋藏、生物有机碳侵蚀)和CO₂源(OC_{petro}氧化、硫化物氧化)。



近期一项发表在*Nature Reviews Earth & Environment*上的研究全面阐述了碳在岩石和大气之间进行转移的各种过程,以及这些转移过程与侵蚀作用的内在联系^[11]。而且,这项研究讨论了尚未被约束的全球碳循环的重要组成部分,并提出了一个新研究框架,主要用于确定山脉是CO₂的源还是汇,同时对未来的进一步深入研究进行了展望,这对全球碳达峰碳中和目标的实现具有重要指导意义。

这项研究指出,大气和岩石间碳的净交换由多个因素决定[图1(b)]。硅酸盐风化和生物有机碳侵蚀/埋藏吸收大气中的CO₂,但OC_{petro}和硫化物氧化排放CO₂。理解侵蚀和造山运动对碳循环的整体影响依赖于碳的转移通量。在目前的许多体系中,碳平衡受碳通量强烈影响,但在当前长期的碳循环地球化学模型中忽视了碳通量(如硫化物氧化通量、生物有机碳侵蚀及埋藏通量、OC_{petro}氧化通量)。

与地质碳循环的碳转移机制有关的碳通量都随着侵蚀率增加而普遍增大;侵蚀不仅去除了植被和土壤中的有机碳,而且增加了水、酸和岩石相互作用区域的矿物补给。然而,侵蚀率和每种碳转移机制的碳通量之间的关系是变化的,这可能部分反映了气候(水文和温度)的控制作用[图1(b)]。就CO₂汇而言,山地的硅酸盐风化反应对水文和温度的变化最为敏感。此外,生物有机碳侵蚀也与径流变化有

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671053;42171053);冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201901)资助

作者简介: 李向应,教授,主要从事冰冻圈地球化学循环研究. E-mail: shaanxilxy@163.com

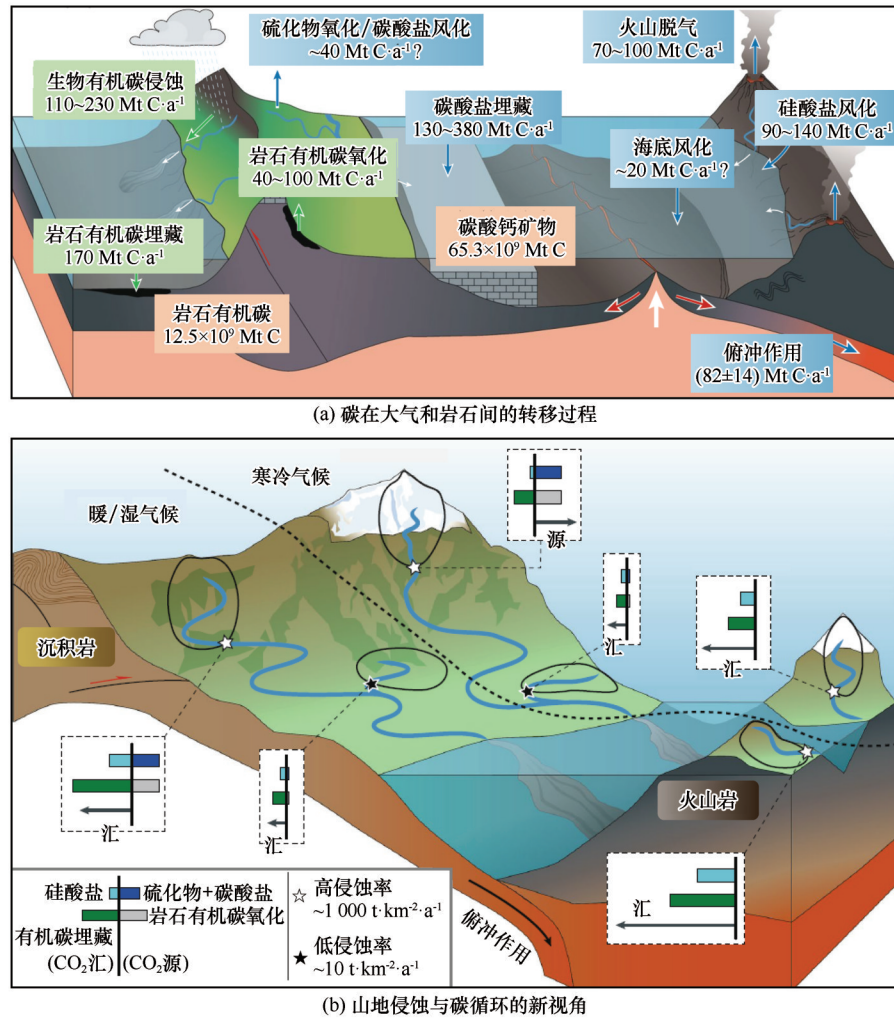


图1 碳在大气和岩石间的转移过程^[11](a)[绿色代表有机碳的转移路径(陆地生物的侵蚀和河流的传输、海洋中有机碳的埋藏、岩石有机碳的氧化风化);相比传统观点,硫化物氧化耦合碳酸盐风化是一个新的 CO_2 源;蓝色代表岩石中以碳酸盐矿物和有机碳形式储存的碳。注:短时间尺度(不超过几十万年)上的碳转移通量(如光合作用、呼吸作用和碳酸盐风化)没有标出];山地侵蚀与碳循环的新视角^[11](b)[在不同气候环境中化学风化引起的 CO_2 源和汇(箭头所示)的通量包括无机碳(硅酸盐风化、硫化物氧化耦合碳酸盐风化)和有机碳(有机碳埋藏、岩石有机碳氧化)的循环通量;白色星号代表风化反应可能受动力限制作用影响的流域,黑色星号代表风化反应受补给限制作用影响的流域;左侧代表沉积岩流域,右侧代表火山岩流域;黑色虚线的左边代表暖/湿气候环境,右边代表寒冷气候环境]

Fig. 1 Transfers of carbon between the atmosphere and rocks^[11] (a) [The emerging view considers the organic-carbon pathways in green for: the erosion of the terrestrial biosphere and transfer by rivers, organic-carbon burial in the ocean and the oxidative weathering of rock organic carbon. Relative to traditional view, additional CO_2 release can occur as a result of sulfide oxidation (shown in blue). Carbon stocks in rocks as carbonate minerals and rock organic carbon are provided (shown in orange). Note that carbon fluxes that operate on short timescales (less than hundreds of thousands of years, such as photosynthesis, respiration and carbonate weathering) are not shown.]; A new view of mountain erosion and carbon cycle^[11] (b) [The CO_2 sources and sinks by weathering in different environments, including fluxes in the inorganic-carbon cycle (silicate weathering and sulfide oxidation) and organic-carbon (OC) cycle (OC burial and rock OC oxidation). Catchments with high erosion rates, where reactions may be 'kinetically limited' and low erosion rates, where reactions are 'supply limited' are referenced by the white and black stars, respectively. Sedimentary-rock-dominated catchments are located on the left and catchments underlain by volcanic rocks on the right. The dotted line separates hotter and/or wetter climates on the near side and cooler climates on the far side.]

关联,因此 CO_2 的汇对碳循环具有负反馈作用。重要的是,这些反馈作用是通过侵蚀来维持的。尽管一些证据表明,气候和 OC_{petro} 氧化之间可能存在着某种

联系,但通过氧化风化作用产生的 CO_2 源通常被认为对气候的依赖性较弱。 CO_2 源也可能通过冰川作用中的氧化风化过程间接地对气候表现出敏感性。

岩石岩性似乎在决定碳通量平衡中起着核心作用。沉积岩山脉可能是大气 CO_2 的源,火山岩山脉可能是 CO_2 的汇[图 1(b)]。了解造山运动对地质时期碳循环的影响取决于岩性、气候和侵蚀控制之间相互作用的量化[图 1(b)]。这种理解将受益于未来基于流域范围的在更广泛空间尺度、岩性和气候条件下对岩石-大气 CO_2 净转移的评估,并需要能够模拟 CO_2 源和汇四个关键过程的碳循环模型。

未来应考虑在典型地区开展集中研究,这些地区有助于确定造山运动、侵蚀加剧和 CO_2 源/汇之间的相互关系。与氧化风化通量、碳排放通量及其控制作用有关的研究是未来的一个探索方向。需要更多研究来理解硫化物氧化和 OC_{petro} 氧化的相关机制,并量化与其相关的 CO_2 排放量。更大范围的研究有利于未来的深入探索,这里包括通过特定岩石类型的风化剖面监测来调查风化对岩性的依赖性,以及通过评估大河流域的 CO_2 净通量来约束地貌景观的控制作用。未来的深入研究还应着眼于温度和水文等气候因素在页岩和沉积岩风化过程中对 OC_{petro} 及硫化物氧化在 CO_2 排放方面的作用。这里,需要结合实地监测、室内实验和数值模拟方法来了解气候与氧化风化排放 CO_2 之间的潜在反馈作用。

对于 CO_2 在岩石和大气之间的净转移,需要研究冲积平原的作用,还要研究滑坡沉积物的风化反应,这些反应可能在活跃的侵蚀地貌中扮演重要角色。更好地理解地形中风化作用发生的位置,有助于厘清土壤源和溶质源硅酸盐风化作用之间的差异。此外,风化和侵蚀在向陆地和海洋生态系统中补给岩石源营养盐方面的作用日益得到认可,但需要更多的研究来量化其对长期碳储存的净影响。

未来应鼓励开展流域尺度的碳收支研究,评估不同环境下大气和岩石间 CO_2 的净交换。尽管火山

岩被认为是硅酸盐风化和 CO_2 下降的关键所在,但当前已有的数据只能在一个火山环境中评估碳收支。这些研究将为考虑所有碳转移机制的模型构建提供经验基础,从而有助于理解造山运动和侵蚀如何影响全球生物地球化学循环。目前完全有机会来设计和测试碳循环模型,这些模型包括生物有机碳的侵蚀和埋藏、 OC_{petro} 及硫化物矿物的氧化风化,因此需要将研究重点从硅酸盐风化上转移。

参考文献(References):

- [1] Urey H C. On the early chemical history of the earth and the origin of life[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1952, 38(4): 351-363.
- [2] Anderson S P. Breaking it down: mechanical processes in the weathering engine[J]. *Elements*, 2019, 15(4): 247-252.
- [3] White A F, Brantley S L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field?[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3/4): 479-506.
- [4] West A J, Galy A, Bickle M. Tectonic and climatic controls on silicate weathering[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1/2): 211-228.
- [5] Gabet E J, Mudd S M. A theoretical model coupling chemical weathering rates with denudation rates [J]. *Geology*, 2009, 37(2): 151-154.
- [6] Maher K, Chamberlain C P. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle[J]. *Science*, 2014, 343(6178): 1502-1504.
- [7] Gaillardet J, Galy A. Himalaya-carbon sink or source?[J]. *Science*, 2008, 320(5884): 1727-1728.
- [8] Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. *Nature*, 2007, 450(7168): 407-410.
- [9] France-Lanord C, Derry L A. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Himalayan erosion[J]. *Nature*, 1997, 390(6655): 65-67.
- [10] Torres M A, West A J, Li Gaojun. Sulphide oxidation and carbonate dissolution as a source of CO_2 over geological timescales [J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 346-349.
- [11] Hilton R G, West A J. Mountains, erosion and the carbon cycle [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(6): 284-299.

A new view of mountain erosion and carbon cycle

LI Xiangying^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2}, DING Yongjian^{3,4,5}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan)

(责任编辑: 赵井东; 编辑: 周成林)