

文章编号:1001-4810(2012)04-0345-04

# 碳酸盐风化碳汇与森林碳汇的对比 ——碳汇研究思路和方法变革的必要性

刘再华<sup>1</sup>, Wolfgang Dreybrodt<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所、环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 德国不来梅大学实验物理研究所, 不来梅 28359)

**摘 要:**目前,全球碳循环研究主要集中在海洋碳汇以及陆地土壤和植被碳汇,而对岩石风化碳汇仅考虑地质长时间尺度的硅酸盐风化作用,而认为碳酸盐风化在长时间尺度上对碳汇无贡献。然而,碳酸盐相对于硅酸盐有快得多的溶解速度,且对全球变化(特别是气候和 CO<sub>2</sub> 变化)的响应迅速,同时由于生物作用和人为活动的影响,使得碳酸盐风化碳汇的能力需要重新评价。最新的研究发现,由碳酸盐溶解、全球水循环及水生生物光合利用溶解无机碳共同作用,即水-岩-气-生相互作用形成的大气碳汇,远远大于之前只估计了河流运输的无机碳汇,其量级与森林碳汇量相当,因此有必要对传统的碳汇研究思路和方法进行某些变革,这有可能为解决所谓的全球“碳失汇”问题找到一条出路。

**关键词:**碳酸盐风化;森林;水-岩-土-气-生相互作用;碳汇评价

**中图分类号:**P642.25;Q945.11

**文献标识码:**A

## 0 引 言

自上世纪 70 年代提出全球碳循环问题以来,至今大气的碳收支仍然得不到平衡的估算,每年存在约数十亿吨的碳不知去向,即所谓的“碳失汇”(missing carbon sink)问题<sup>[1]</sup>,这也成为各国政府是否需要履行《京都议定书》的科学障碍。从碳循环的各项分量(大气、陆地和海洋)和已有的研究报道来看,“碳失汇”最有可能是陆表固碳机制及其估算不确定性所带来的结果。

目前,全球碳循环研究主要集中在海洋碳汇以及陆地土壤和植被碳汇,而对岩石风化碳汇仅考虑地质长时间尺度的硅酸盐风化作用,而认为碳酸盐风化在长时间尺度上对碳汇无贡献<sup>[2]</sup>。然而,碳酸盐相对于硅酸盐有快得多的溶解速度<sup>[3]</sup>,且对全球变化(特别是气候和 CO<sub>2</sub> 变化)的响应迅速,具有显著的日变化、暴雨动态、季节变化和多年变化<sup>[4-6]</sup>,同时由于生

物作用和人为活动的影响,使得碳酸盐风化碳汇的能力需要重新评价。如我们最新的研究<sup>[7-8]</sup>发现,由碳酸盐溶解、全球水循环及水生生物光合利用溶解无机碳共同作用(即水-岩-气-生相互作用)形成的大气碳汇,远远大于之前只估计了河流运输的无机碳汇,其量级与森林碳汇量相当,该发现也呼唤碳汇研究思路和方法的变革。

## 1 碳酸盐风化碳汇能力及其与森林碳汇能力的对比

### 1.1 碳酸盐风化碳汇能力

在最新一次估算大气 CO<sub>2</sub> 汇的尝试中,我们<sup>[7-8]</sup>综合考虑了碳酸盐溶解、全球水循环和水生生物光合利用溶解无机碳(DIC=CO<sub>2</sub>(aq)+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)对大气 CO<sub>2</sub> 汇的作用[这里称为基于水-岩-气-生相互作用的碳酸盐风化碳汇作用:CaCO<sub>3</sub>+CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CB956700);中国科学院战略性科技先导专项重大课题(XDA05070400)

第一作者简介:刘再华(1963-),男,研究员,博士生导师。E-mail:liuzaihua@vip.gyig.ac.cn.

收稿日期:2012-10-10

$O \Rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + \text{水生光合生物} \Rightarrow CaCO_3 + x(CO_2 + H_2O) + (1-x)(CH_2O + O_2)$ , (图 1)<sup>[3-9]</sup>, 以区别于传统的基于水-岩-气相互作用的碳酸盐风化碳汇仅考虑无机碳汇过程:  $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ <sup>[2,10,11]</sup>, 发现陆地碳酸盐风化形成的大气  $CO_2$  净汇是 4.77 亿 t C/a (图 2 中的陆地水生生态系统“生物碳泵作用”产生的有机碳汇+河流入海的无机碳汇), 这大约是 Gaillardet et al. (1999)<sup>[11]</sup> 估算结果 1.48 亿 t C/a 的 3 倍。

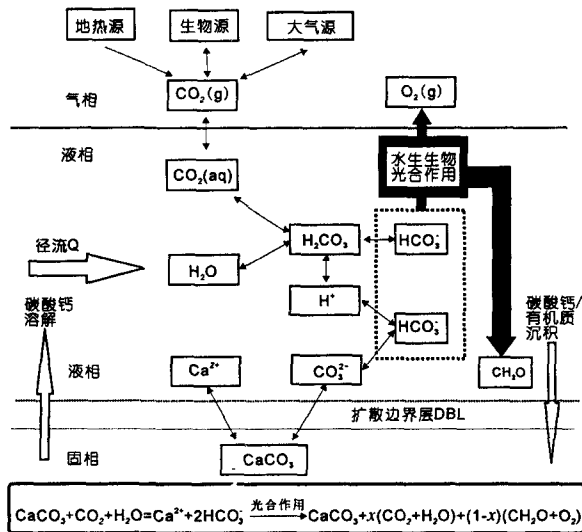


图 1 基于水-岩-气-生相互作用的碳酸盐风化(岩溶作用)碳循环模式图(据文献[9]改动)

Fig. 1 Carbon cycle model of carbonate weathering by water-rock-gas-organism interaction (modified from References[9])

注:与传统的水-岩-气相互作用碳酸盐风化碳循环模式不考虑有机过程(水生生物光合利用 DIC 形成有机质沉积,图中黑色部分)不同,本模式将有助于回答“碳酸盐风化能否形成长久的碳汇(内源有机质沉积埋藏),因而能否控制长时间尺度的气候变化”等重要科学问题,同时也为传统的岩溶作用碳循环模式遇到的碳稳定性问题找到了出路。

出现这一重要差异是因为 Gaillardet et al. (1999)<sup>[11]</sup> 的反演模型计算不仅低估了硅酸盐地区少量碳酸盐矿物风化对大气  $CO_2$  汇的重要作用<sup>[3]</sup>, 而且也未考虑陆地水生生态系统光合生物对 DIC 的利用(这里称“生物碳泵作用”)以及由此形成的有机碳汇(2.33 亿 t C/a,图 2)<sup>[3,8]</sup>。这也进一步表明,传统的利用大江大河入海的 DIC(以  $HCO_3^-$  为主)通量来估算岩石风化碳汇的方法<sup>[10-11]</sup> 是值得商榷的,因为这些河流还有入海的总有机碳(TOC = POC + DOC),其中,相当一部分是内源有机碳,即是水生生物对岩石风化形成的 DIC 的光合利用转换而来的,应当归属于岩石风化对碳汇的贡献<sup>[9]</sup>,而这一部分以

往被认为是土壤或岩石侵蚀而来的外源有机碳<sup>[10]</sup>。可见,仅利用大江大河入海口的 DIC 数据而不考虑内源有机碳 TOC(包括入海的和在陆地水生生态系统中沉积的,图 2),会严重低估岩石风化作用对碳汇的贡献<sup>[3]</sup>。

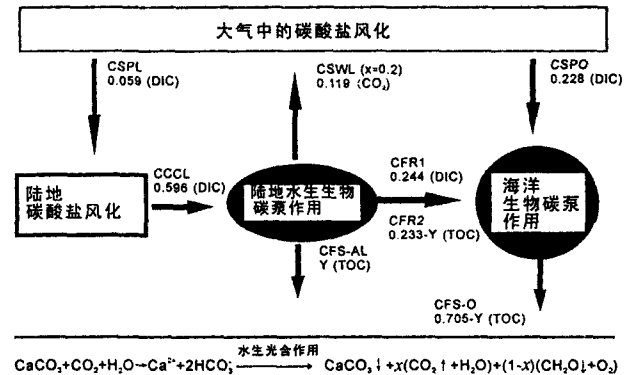


图 2 基于水-岩-气-生相互作用的碳酸盐风化形成的大气  $CO_2$  源汇(10 亿 t C/a) (据文献[9]修改)

Fig. 2 Atmospheric carbon sources and sinks of carbonate weathering by water-rock-gas-organism interaction (Pg C/a) (modified from References [9])

CSPL: 陆地降水形成的碳汇; CSPO: 海洋降水形成的碳汇; CCCL: 陆地碳酸盐风化碳捕获通量; CSWL: 陆地水体碳排放通量; CFR1: 河流入海 DIC 通量; CFR2: 河流入海内源 TOC 通量; CFS-AL: 陆地水体中内源有机质沉积通量(Y: 待确定); CFS-O: 海洋中陆源内源有机质沉积通量; DIC: 溶解无机碳; TOC: 内源总有机碳

注:传统的水-岩-气相互作用碳酸盐风化碳循环(或岩溶作用碳循环)模式不考虑有机过程,所以  $x=1$ ,即碳酸钙沉积时, $CO_2$  气体全部返回大气,因此,在地质长时间尺度上,碳酸盐风化不产生碳汇,因而也就不会影响长时间尺度的气候变化<sup>[2]</sup>。

### 1.2 与森林碳汇能力的对比

上述最新获得的陆地碳酸盐风化形成的大气  $CO_2$  净汇(4.77 亿 t C/a)<sup>[3,8]</sup>, 约占 1990—2007 年间世界森林碳汇(11 亿 t C/a)<sup>[12]</sup> 的 43%, 足以说明碳酸盐风化碳汇在全球碳循环中的重要性。

作为世界岩溶大国的我国碳酸盐岩分布面积约占世界的 1/6, 达到 346.3 万  $km^2$ <sup>[13]</sup>。据初步估算, 岩溶作用净回收大气  $CO_2$  的量可达 1 800 万 t C/a<sup>[4]</sup>, 但这是仅考虑无机过程的结果, 若综合考虑地表水体水生生物光合利用 DIC 形成的内源有机碳 TOC 浓度(与 DIC 相当)<sup>[8,14]</sup>, 则岩溶作用净回收大气  $CO_2$  的量可达 3 600 万 t C/a, 这一数值占 1981—2000 年间我国森林碳汇(7 500 万 t C/a)<sup>[15]</sup> 的 48%, 说明岩溶作用在我国碳循环中的特殊重要性。再考虑我国大面积黄土碳酸盐的分布及其它含碳酸盐矿物地层的存在, 则我国总的碳酸盐风化碳汇能力可能

大大高于全球平均值。

另一方面,与传统的将岩石风化碳汇作为一个定值不同,我们发现,碳酸盐风化对全球变化(特别是气候和  $\text{CO}_2$  变化)的响应迅速,具有显著的日变化、暴雨动态、季节变化和多年变化<sup>[4-6]</sup>,而且,随着全球变暖和人类活动的增强,碳酸盐风化碳汇能力将进一步增加<sup>[4,8,16]</sup>。

由此可见,有必要将碳酸盐风化碳汇纳入现代全球碳循环中一并考虑。

## 2 碳汇研究思路和方法变革的必要性

以上基于水-岩-气-生相互作用的理念,从全球尺度就碳酸盐风化碳汇能力与森林碳汇能力进行了比较宏观和粗略的对比,发现两者基本在一个数量级,即每年几亿至十亿吨碳<sup>[8,12]</sup>,反映了碳酸盐风化碳汇与森林碳汇一样,在全球碳循环中是重要的碳汇机制,而且随着全球变暖和人类活动的增强,碳酸盐风化碳汇能力将进一步增加,因此,有必要将碳酸盐风化碳汇纳入现代全球碳循环中一并考虑(图 3)。然而,为了更准确地揭示碳酸盐(岩)分布区的碳循环过程和碳酸盐风化碳汇对全球碳汇的贡献,有必要对传统的碳汇研究思路和方法进行变革。

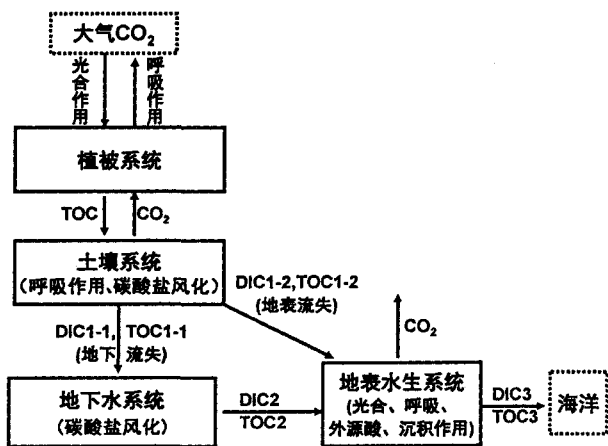


图 3 基于水-岩-土-气-生相互作用的碳酸盐(岩)地区碳循环模式图

Fig. 3 Model of the carbon cycle in carbonate (rock) areas based on water-rock-soil-gas-organism interaction

### 2.1 碳汇研究思路改变的必要性

陆表过程固碳主要有两条途径,一是植物通过光合作用把大气中碳以有机碳的形式储存在生态系统中;二是通过岩石化学风化把大气中的碳以溶解无机碳及其光合形成的有机碳的形式储存在水体中<sup>[3,8]</sup>。而在碳酸盐(岩)地区,由于快速的碳酸盐风化作用

(又称岩溶作用,或喀斯特作用),无机碳循环与有机碳循环同等重要,相互渗透,彼此耦合,二者贯穿于水-岩-土-气-生相互作用碳循环的各个过程,构成不可分割的统一体(图 3)。但目前陆地生态系统碳循环模式研究大多是以有机碳循环为主,而无机碳循环或无机碳循环与有机碳循环的相互作用被忽视了。因此,阐明碳酸盐(岩)地区无机碳与有机碳循环的耦合关系,是体现碳酸盐(岩)地区碳循环模式的关键。

总之,我们需要从原来光合作用和水-岩-气相互作用分列的研究转变到水-岩-土-气-生相互作用的研究(图 3),即强调碳酸盐风化碳汇与有机碳汇在岩溶地区碳循环中有着同等重要的地位,这是碳酸盐(岩)地区碳循环的显著特征,即在碳酸盐(岩)地区,必须将大气、植被、土壤、碳酸盐和水体作为一个整体(图 3)考虑来进行碳循环的研究。

### 2.2 岩石风化碳汇评价方法的改变

传统的基于水-岩-气相互作用的岩石风化碳汇评价仅考虑无机组分,其计算可简单表示如下:

$$CSF = F_{\text{DIC}} = n \times Q \times [\text{DIC}] \times 12/A$$

式中:  $CSF$  为岩石风化碳汇强度(或碳汇通量);  $F_{\text{DIC}}$  为流域无机碳汇通量;  $A$  为流域面积;  $Q$  为流域径流排泄量;  $[\text{DIC}]$  为水中溶解无机碳的摩尔浓度; 12 为碳的原子量;  $n$  为岩石风化碳汇系数。在岩石风化碳汇系数取值中,对于碳酸盐风化,  $n=0.5$ , 表示碳酸盐溶解形成的  $\text{HCO}_3^-$  中只有一半是大气成因的碳; 对于硅酸盐风化,  $n=1$ , 表示硅酸盐风化形成的  $\text{HCO}_3^-$  的碳全部来自大气成因的碳(包括土壤  $\text{CO}_2$ )<sup>[8]</sup>。

然而,由于存在水生生物光合作用对  $\text{DIC}$  的利用(图 1),水体中的  $\text{DIC}$  有相当大的比例转换为有机质(图 2),形成所谓的内源有机碳  $\text{TOC}$ 。因此,为正确反映岩石风化碳汇能力,有必要将这部分内源有机碳也考虑在内,即岩石风化碳汇强度  $CSF$  应改写为:

$$CSF = F_{\text{DIC}} + F_{\text{TOC}} + F_{\text{SOC}} = n \times Q \times [\text{DIC}] \times 12/A + n \times Q \times [\text{TOC}] \times 12/A + F_{\text{SOC}}$$

式中:  $F_{\text{TOC}}$  为流域内源有机碳汇通量;  $F_{\text{SOC}}$  为流域内源有机质沉积通量;  $[\text{TOC}]$  为流域内源有机碳摩尔浓度; 其它意义同前。

最后,需要说明的是,尽管地球深部来的  $\text{CO}_2$  及其对岩石的溶解也能增加水中的  $\text{DIC}$  浓度,但由于这部分碳是非大气成因的,因而不但不能成为碳汇,而且可能成为碳源,因此必须在碳汇计算中加以扣除<sup>[9]</sup>。此外,自然界除了碳酸外,硫化物氧化形成的硫酸对碳酸盐的溶解也能增加水中的  $\text{DIC}$  浓度,其作用类似于深部  $\text{CO}_2$  的影响,因此也必须在碳汇计算中加以扣除<sup>[9]</sup>。

## 参考文献

- [1] Melnikov N B, O'Neill B C. Learning about the carbon cycle from global budget data[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L02705.
- [2] Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon-dioxide over the past 100 million years[J]. *Am J Sci*, 1983, 283: 641—683.
- [3] Liu Z, Dreybrodt W, Liu H. Atmospheric CO<sub>2</sub> sink: Silicate weathering or carbonate weathering? [J]. *Appl Geochem*, 2011, 26: 292—294.
- [4] Liu Z, Zhao J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO<sub>2</sub> sink[J]. *Environ Geol*, 2000, 39: 1053—1058.
- [5] Liu Z, Li Q, Sun H, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO<sub>2</sub> and dilution effects[J]. *J Hydrol*, 2007, 337: 207—223.
- [6] Macpherson G L, Roberts J A, Blair J M. Increasing shallow groundwater CO<sub>2</sub> and limestone weathering, Konza Prairie, USA[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 5581—5599.
- [7] 刘再华, Dreybrodt W, 王海静. 一种由全球水循环产生的可能重要的 CO<sub>2</sub> 汇[J]. *科学通报*, 2007, 52: 2418—2422.
- [8] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO<sub>2</sub> budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. *Earth-Sci Rev*, 2010, 99: 162—172.
- [9] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. *科学通报*, 2012, 57: 95—102.
- [10] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: Sources, global typology and budget[J]. *Water Air Soil Poll*, 1993, 70: 443—463.
- [11] Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chem Geol*, 1999, 159: 3—30.
- [12] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333: 988—993.
- [13] 蒋忠诚, 裴建国, 夏日元, 等. 我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J]. *中国岩溶*, 2010, 29: 349—354.
- [14] Waterson E J, Canuel E A. Sources of sedimentary organic matter in the Mississippi River and adjacent Gulf of Mexico as revealed by lipid biomarker and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  analyses[J]. *Org Geochem*, 2008, 39: 422—439.
- [15] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37: 804—812.
- [16] Raymond P A, Oh N H, Turner R E, Broussard W. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River[J]. *Nature*, 2008, 451: 449—452.

## Comparison of carbon sequestration capacity between carbonate weathering and forests: The necessity to change traditional ideas and methods of study of carbon sinks

LIU Zai-hua<sup>1</sup>, Wolfgang Dreybrodt<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Institute of Experimental Physics, University of Bremen, Bremen 28359, Germany)

**Abstract:** At present, researches on the modern global carbon cycle focuses mainly on carbon sinks caused by the oceans and the terrestrial soils and vegetations. In addition, chemical weathering of Ca-silicate rocks is considered to have the potential in controlling long-term climate change by providing feedback interactions with atmospheric CO<sub>2</sub> drawdown by means of the precipitation of carbonate. In contrast, carbonate weathering itself has not been given equivalent attention although it is much more rapid than silicate weathering and more sensitive to global changes (especially climate and CO<sub>2</sub> change). Further, biological and human activities also significantly influence carbonate weathering. Thus, the contribution of carbonate weathering to the atmospheric CO<sub>2</sub> sink should be re-evaluated. Latest studies show that the carbon sink through the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle, and photosynthetic uptake of dissolved inorganic carbon by aquatic organisms (i. e., by carbonate weathering via the water-rock-gas-organism interaction) is far greater than previous estimates that have only considered the transport of dissolved inorganic carbon by rivers, and have a similar magnitude to that of the terrestrial carbon sink in global forests. Therefore, changes in traditional ideas and methods of carbon sink study are necessary, and may provide a way to solve the so-called global “missing carbon sink” problem.

**Key words:** carbonate weathering; forest; water-rock-soil-gas-organism interaction; carbon sink assessment

(编辑 韦复才)