

张莹,李强.是“岩溶碳汇”还是“岩溶碳通量”? [J].中国岩溶,2015,34(6):539-542.  
DOI:10.11932/karst20150601

## 是“岩溶碳汇”还是“岩溶碳通量”?

张莹,李强

(国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室/中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004)

**摘要:**大气碳收支不平衡问题是全球碳循环研究的核心问题之一,决定了人类活动导致的气候变化速度和程度。在过去50年,陆地和海洋作为全球碳循环的主要汇呈增加趋势,而岩溶作用( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$ )则通过与岩石圈、水圈、大气圈(层)的密切联系成为联系陆地和海洋碳库的纽带。尽管岩溶作用在水循环和生物圈的作用下,每年可产生约8亿t的碳通量,使岩溶作用过程成为全球碳循环的一个重要环节。但在目前研究技术手段和认识水平的条件下,将岩溶作用这一可逆过程直接认定为岩溶碳汇有不妥之处。因此,在没有涉及生物固碳效应的前提下,应当将岩溶作用参与的碳循环表述为岩溶碳通量。

**关键词:**岩溶;碳汇;碳通量;碳循环

**中图分类号:**P642.25

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2015)06-0539-04

目前,人类所面临的全球增暖、臭氧层破坏、森林锐减、物种灭绝、土地退化等一系列环境问题主要源于碳的自然循环系统失调。工业革命以来,大气中主要温室气体 $\text{CO}_2$ 与 $\text{CH}_4$ 的浓度持续增加, $\text{CO}_2$ 浓度累计增加了约40%,由工业革命前的 $278 \times 10^{-6}$ 增加到2011年的 $390.5 \times 10^{-6}$ ;  $\text{CH}_4$ 增加最多,增加了150%,由 $722 \times 10^{-9}$ 增加到2011年的 $1.803 \times 10^{-9}$ 。过去10年大气中 $\text{CO}_2$ 浓度上升速率是自1958年人类直接观测大气 $\text{CO}_2$ 浓度以来最快的10年。2种温室气体当前的浓度是过去80万年以来冰芯记录的最高浓度,其增速也超过了过去2万年的平均值。可见自工业革命以来,人类活动对全球气候的影响显著,温室气体的排放量和排放速度都是前所未有的<sup>[1]</sup>。

为了合理预测气候变化,特别是全球变暖对陆地生态系统造成的影响,各国学者都重视对全球碳循环的研究,特别是加强了对大气碳收支不平衡的探讨。据估计,20世纪80年代期间,人类平均每年向大气排放 $\text{CO}_2$ 约7.1 Pg C,比每年大气中积累的碳( $3.3 \pm 0.2$  Pg C)和海洋吸收的碳( $2.0 \pm 0.8$  Pg C)之和

要多1.8 Pg C/a,即可能存在一个未知的碳汇,国外学者称其为失汇(Missing sink)<sup>[2]</sup>。从目前对大气 $\text{CO}_2$ 源汇研究结果来看,着重寻找的碳失汇最有可能存在于陆地生态系统中。因此,我国地质工作者为应对全球环境变化,通过开展岩溶地质作用与碳循环研究,获取一系列研究成果,其中,Liu等<sup>[3]</sup>认为岩溶过程中存在的碳酸盐(岩)风化溶解—全球水循环—水生生物光合作用所产生的岩溶碳汇高达 $8.24 \times 10^{-1}$  Pg/a ( $8.24 \times 10^8$  t/a),约占全球遗失碳汇的29%或占人类活动排放碳总量的10%;而蒋忠诚等<sup>[4]</sup>研究结果表明中国岩溶碳汇总量为 $3.6991 \times 10^{-2}$  Pg/a ( $3.6991 \times 10^4$  t/a)。然而针对岩溶碳循环过程是不是具有碳汇效应,《Science》杂志分别在2011年和2012年发文进行了辩论<sup>[5-7]</sup>。笔者认为岩溶碳循环作为全球碳循环中的一个重要环节(图1)<sup>[8]</sup>,尽管在认识全球变化过程中具有重要的意义,但如果将岩溶作用所参与的碳循环表述为岩溶碳汇确有不妥之处。原因如下:

基金项目:广西自然科学基金项目(2015GXNSFGA139010, 2014GXNSFCA118012, 桂科合14123001-13)

第一作者简介:张莹(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境科学。

通讯作者:李强(1978-),男,博士,研究员,主要研究方向为岩溶生物地球化学。E-mail:glqiangli@163.com。

收稿日期:2015-05-26

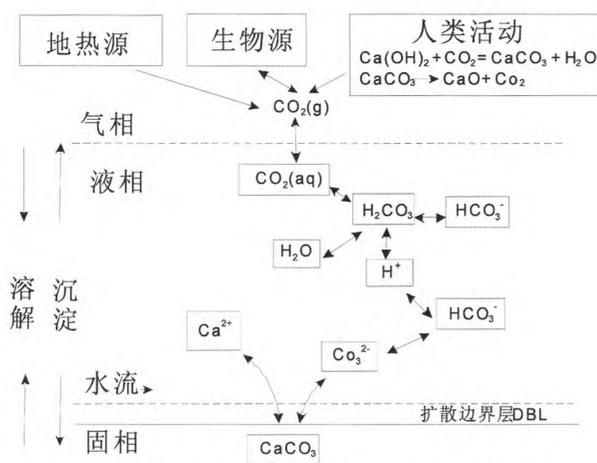


图1 岩溶动力系统概念模型 (据袁道先, 2008)

Fig. 1 Conceptual model of the karst dynamics system (after Yuan, 2008)

## 1 “碳汇”与“碳通量”的区别

“碳汇”(Carbon sink)来源于《联合国气候变化框架公约》缔约国签订的《京都议定书》,由此形成了国际“碳排放权交易制度”(简称“碳汇”)。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)将碳汇定义为从大气中清除二氧化碳的过程、活动或机制,它主要是指森林吸收并储存二氧化碳的多少,或者说是森林吸收并储存二氧化碳的能力<sup>[9]</sup>。而广义的碳汇是指在自然或人工干预下能够长时间保存的含碳化合物<sup>①</sup>。

“碳通量”(Carbon flux)是碳循环研究中一个最基本的概念,表述生态系统通过某一生态断面的碳元素的总量。例如:某河流的碳通量,就是流过河流断面的有机碳和无机碳的总量;某森林生态系统碳通量,就是该生态系统单位时间,单位面积上的碳循环总量;海洋的碳通量是单位时间和单位面积内碳增减的数量<sup>[10]</sup>。

## 2 影响岩溶作用的关键因素

岩溶作用发生在  $\text{CO}_2$ -水-碳酸盐岩三相不平衡的开放系统中<sup>[11]</sup>。在自然界,这种作用必然与碳循环相耦联,并经过大气圈、岩石圈、水圈与生物圈参与全球碳循环,进而产生两方面的重要意义:一是碳酸盐岩的溶蚀参与岩溶地貌的形成,二是碳酸盐的沉积为岩溶记录可提供高分辨率环境变化信息<sup>[11-12]</sup>。因此,通过认识影响岩溶作用的关键因素能够明确岩

溶碳循环过程究竟是“岩溶碳汇”还是“岩溶碳通量”。

### 2.1 岩溶作用中的碳通量及其影响因素

在  $\text{CO}_2$ -水-碳酸盐岩代谢体系中,由于碳酸盐岩中赋存着全球 99.55% 的碳 ( $6 \times 10^{16} \text{ t}$ )<sup>[13]</sup>,数量极其庞大,因此影响  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^-$  这一可逆反应产生碳循环的控制因子为水和二氧化碳。

参与岩溶作用过程的二氧化碳可区分为:幔源二氧化碳和表层岩溶带二氧化碳。幔源二氧化碳由许多现代正在活动的断层释放,如四川黄龙、云南白水台、美国的黄石公园;而表层岩溶带的二氧化碳主要来源于土壤微生物对动植物遗体的分解、植物根系和土壤原生动物的呼吸<sup>[14]</sup>。在板块构造接触带附近的岩溶地区,存在大量的钙华沉积,每沉积 1 t 钙华就意味着向大气释放约 120 kg 的碳<sup>[15]</sup>,同时近年来的调查观测证实地壳深部有很大的二氧化碳源<sup>[13]</sup>。而表层岩溶带来源的二氧化碳,如果没有水圈和生物圈的调节(即水循环的增加和生物的再次固定),最终也将重新释放到大气中。

参与岩溶作用过程的水受全球变暖的影响,造成全球水循环的加强,并使碳酸盐岩的溶解量得到进一步的增加。Liu 等<sup>[3]</sup>认为“综合考虑碳酸盐溶解、全球水循环和水生生物光合作用的共同影响是研究大气二氧化碳源汇估算的新方向”,并预测到 2100 年全球变暖将会导致全球碳酸盐风化碳汇增加 21%,或 1.8 亿吨/年。在全球降水增加以及水生植物光合作用的共同促进下,可以看出岩溶水体  $\text{HCO}_3^-$  的去向:①滞留在水圈并随水圈迁移,增加碳周转时间<sup>[16-17]</sup>;②进入海洋,经过海洋的生物地球化学循环被固定下来,成为海洋碳储的一部分<sup>[18-19]</sup>;③进入岩溶区的水库、湖泊、河流等水域,通过水生植物的光合作用转变为岩溶水体中的内生 DOC,改变河流碳通量<sup>[20]</sup>。滞留在水圈中的  $\text{HCO}_3^-$  数量主要受制于全球水循环强度, $\text{HCO}_3^-$  只是长期滞留在水圈中,并且其碳循环周转速率由水圈决定。进入海洋以及岩溶水域的  $\text{HCO}_3^-$  则由水生生物生成 DOC,其固定速率由水生植物的光合能力决定,目前其固定值已囊括在海洋和湖泊的碳储量统计范畴之内<sup>[18-20]</sup>。因此,如果将碳酸盐溶解-全球水循环-水生植物光合作用的联合过程成为定义岩溶碳汇的关键因素,会干扰人们的研究视线,进而无法厘定他们在岩溶碳通量过程中的比重和作用。

① [https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_sink](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_sink).

因此,根据参与岩溶作用的二氧化碳来源以及水圈的作用,可以看出岩溶碳循环主要表现出单位时间和单位面积内碳数量的增减。

## 2.2 岩溶碳通量的碳汇机制与效应

在全球降水增加导致碳酸盐岩溶解量即水体 DIC(Dissolved Inorganic Carbon)增加的同时,全球变暖还造成光照强度和水体温度的升高<sup>[21]</sup>。根据水生植物在水体中所处的位置,可将水生植物分为沉水植物、挺水植物和浮水植物。沉水植物能够直接利用水体中的  $\text{HCO}_3^-$  作为碳源进行光合作用,并且该类植物的最大光合速率、半饱和光强和呼吸速率都随着光照和水体温度的增加而增加<sup>[22]</sup>。此外,沉水植物,譬如 *Fontinalis antipyretica* 和 *Hydrilla verticillata*,其最大光合速率能够随水体 DIC 的增大而增大;当在水体中可利用 DIC 含量较低时( $<1.3 \text{ mM DIC}$ ), *Hydrilla verticillata* 则发生光抑制现象<sup>[23-24]</sup>。对于浮水植物和挺水植物,随着温度和湿度的增加,植物孔径放大,能让更多通过水-汽界面交换的二氧化碳进入叶片,使光合作用更快的进行,并且这一现象已被蒙大拿大学林学院的研究人员 Rama Krishna Nemani 等利用计算机模式分区域模拟降水所证实<sup>[25]</sup>。

水体中的  $\text{HCO}_3^-$  除了藻类通过产氧的光合作用机制固定下来外,某些细菌也能够固定水体中的  $\text{HCO}_3^-$  并拥有不产氧光合途径,这类细菌被称为“好氧不产氧光合异养细菌”(aerobic anoxygenic phototrophic bacteria, AAPB)<sup>[26]</sup>。AAPB 广泛分布于海洋、热泉、河流、内陆湖泊等各种环境,其生物量占整个微生物群落的比例,在海洋中约为 11%,在河口中最高可达 34%,而在一些湖泊中的比例甚至超过了 50%<sup>[27]</sup>。Dittrich 和 Obst<sup>[28]</sup> 通过卫星图像发现美国密西根湖以及瑞士卢塞恩湖在夏季会产生季节性的碳酸钙沉积即“泛白事件”,但是藻类繁盛的高峰期与方解石沉淀事件并不同步,仅与微型蓝细菌的繁盛有密切的关系。Bristow 等<sup>[29]</sup> 在研究美国绿河组剖面的有机碳、硅酸盐和碳酸盐含量关系时发现微生物在有机碳沉积过程中具有重要的作用;Smith 等<sup>[30]</sup> 发现北美石油形成过程中的有机碳来源于微生物活动。

此外,传统观点通常认为土壤微生物主要参与表层岩溶带来源的二氧化碳释放过程,但 Li 等<sup>[31]</sup> 在桂林丫吉岩溶试验场长期定位实验的基础上,采用实时荧光定量(Real-time PCR)技术和水化学监测相结合的方法发现:土壤二氧化碳固定细菌数量与土壤有机碳质量分数显著正相关( $P < 0.0003$ ),即土壤二氧化碳固定细菌数量越高土壤,有机碳质量分数越大,

并且土壤二氧化碳固定细菌通过参与  $\text{CO}_2$ -水-碳酸盐岩过程产生同位素分馏效应,该研究被室内模拟实验所证实,并认为在理想状态下,全球土壤微生物的年碳同化量高达  $0.3 \sim 3.7 \text{ Pg}$ <sup>[32]</sup>。

因此,岩溶作用在生物圈的参与下不但改变了碳循环周期,还能产生有机碳埋藏现象,进而产生碳汇效应。

## 3 结束语

通过阐述“碳汇”与“碳通量”的概念以及影响岩溶作用的关键因素,可以清晰的看出,在没有生物圈的参与下,岩溶碳循环过程的正确表述应是岩溶碳通量。岩溶碳通量作为全球碳循环中的一个重要环节,还表现为陆地碳酸盐岩经风化、侵蚀由河网系统向海洋和大陆沉积中心输送碳的过程,并在特定时间和地区进行单向流动<sup>[33]</sup>, $\text{CO}_2$  以及  $\text{HCO}_3^-$  向海洋和大陆沉积中心输送过程,在生物圈的干预下将会使有机碳固定下来,产生碳汇效用。因此,综合考虑岩溶作用过程中碳酸盐溶解、全球水循环以及生物作用所产生的联合效应,则可进一步明确影响岩溶碳循环过程的环境因子,进而丰富和促进岩溶动力学理论的发展。

## 参考文献

- [1] 於刚,朴世龙. IPCC 第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展,2014,(1):33-36.
- [2] Houghton R A, Davidson E A, Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998,(12):25-34.
- [3] Liu Z H, Wolfgang D, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric  $\text{CO}_2$  budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. Earth Science Reviews, 2010,99(3-4):162-172.
- [4] 蒋忠诚,袁道先,曹建华,等. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报,2012,(2):129-134.
- [5] Christina L. An unsung carbon sink[J]. Science, 2011, 334(6058):886-887.
- [6] Groves C, Cao J H, Zhang C. Response-carbon shifted but not sequestered[J]. Science, 2012, 335(6069):655.
- [7] Rane L C. Carbon shifted but not sequestered[J]. Science, 2012, 335(6069):655.
- [8] 袁道先,章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 2008,29(3):355-365.
- [9] Kyoto Protocol [EB/OL]. www.un.org/law/avl. 1997.
- [10] Watson A. The global survey of  $\text{pCO}_2$ [J]. IGBP Global Change Newsletter, 1999,37:6-7.
- [11] Legrand H E. Hydrological and ecological problems of karst re-

- gions-hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems[J]. *Science*, 1973, 179(4076): 859–864.
- [12] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. *科学通报*, 1995, 40(13): 1210–1213.
- [13] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应[J]. *第四纪研究*, 2001, (3): 223–232.
- [14] 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚. 碳循环与岩溶地质环境[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 刘再华, 袁道先, Dreybrodt W, 等. 四川黄龙钙华的形成[J]. *中国岩溶*, 1983, 12(3): 185–191.
- [16] John P D, Michel M, James C O, et al. Land and water interface zones[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, 70(1–4): 123–137.
- [17] Semiletov I P. Aquatic sources and sinks of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the polar regions[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56: 286–306.
- [18] Ritschard R L. Marine algae as a CO<sub>2</sub> sink[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1992, 64(1–2): 289–303.
- [19] Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean[J]. *Nature*, 1993, 365: 119–125.
- [20] John J W. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen[J]. *Nature*, 1991, 350: 53–55.
- [21] Donat P H, Kumar H D, Smith R C, et al. Aquatic ecosystems: effects of solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors[J]. *Photochemistry and Photobiology Sciences*, 2003, 2: 39–50.
- [22] Bulthuis D A. Effects of temperature on the photosynthesis-irradiance curve of the Australian seagrass, *Heterozostera tasmanica*[J]. *Marine Biology Letters*, 1983, 4(1): 47–57.
- [23] Maberly S C. Photosynthesis by *fontinalis antipyretica*. Part 1, Interaction between photon irradiance, concentration of carbon dioxide and temperature[J]. *New Phytologist*, 1985, 100(2): 127–140.
- [24] White A, Reiskind J B, Bowes G. Dissolved inorganic carbon influences the photosynthetic responses of *Hydrilla* to photoinhibitory conditions[J]. *Aquatic Botany*, 1996, 53(1–2): 3–13.
- [25] Richard A L. Rain might be leading carbon sink factor[J]. *Science*, 2002, 296(5574): 1787.
- [26] Waidner L A, Kirchman D L. Aerobic anoxygenic phototrophic bacteria attached to particles in turbid waters of the Delaware and Chesapeake estuaries[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(12): 3936–3944.
- [27] Shi L, Cai Y, Chen Z, et al. Diversity and abundance of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria in two cyanobacterial bloom-forming lakes in China[J]. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2010, 46(4): 233–239.
- [28] Dittrich M, Obst M. Are picoplankton responsible for calcite precipitation in lakes? [J]. *Ambio*, 2004, 33(8): 559–64.
- [29] Bristow T F, Kennedy M J, Morrison K D, et al. The influence of authigenic clay formation on the mineralogy and stable isotopic record of lacustrine carbonates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 90(4): 64–82.
- [30] Smith M E, Carroll A R, Scott J J, et al. Early Eocene carbon isotope excursions and landscape destabilization at eccentricity minima: Green river formation of Wyoming [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 403: 393–406.
- [31] Li Q, Wang H, Jin Z J, et al. The carbon isotope fractionation in the atmosphere-soil-spring system associated with CO<sub>2</sub> fixation bacteria at Yaji karst experimental site in Guilin, SW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5393–5401.
- [32] Ge Tida, Wu X H, Chen X J, et al. Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO<sub>2</sub> in China subtropical upland and paddy soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113(4): 70–78.
- [33] Degens E T, Kempe S, Spitey A. CO<sub>2</sub>: A biogeochemical portrait [M]. *The Handbook of environmental Chemical*, Vol 1. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 127–251.

## Is it karst carbon sink or karst carbon flux?

ZHANG Ying, LI Qiang

(Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Imbalanced atmospheric carbon flow has been a critical problem in the study of global carbon cycle since the 1970s, which has attracted a lot of attentions from policy makers and scientists. After investigating the global carbon budgets, it is cognized that the assessed carbon sink has tended to increase globally in the past 50 years, which largely take place in terrestrial and oceanic ecosystems. In a karst process ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$ ), the  $\text{HCO}_3^-$  which connects the lithosphere, hydrosphere and atmosphere becomes a part of the carbon pool of the terrestrial ecosystem and ocean. Recent research proved that global karst carbon flux is around  $8 \times 10^8$  tons per annum. Because of the complexity of carbon cycles in the karst process, there are many difficulties to confirm the existence of karst carbon sink, or to determine the location and causes of karst carbon sink. Therefore, it is suggested to use the correct depiction for the study of karst carbon cycle and its geological function, which may contribute to karst dynamic theory.

**Key words** karst, carbon sink, carbon flux, carbon cycle

(编辑 张玲)