

# 岩溶地质碳汇的稳定性

## ——以贵州草海地质碳汇为例

张强

中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室,  
联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004

**摘要:** 近几年来对岩溶碳汇的争论越来越多, 其关键问题是岩溶作用产生的重碳酸根是否稳定。本文以贵州草海流域为研究区, 基于前人研究基础, 以碳同位素模型计算出岩溶作用产生的 DIC(Dissolved Inorganic Carbon 溶解无机碳)中 58.8%为草海中为水生植物利用, 草海地质碳汇量达 588.67 tC/a。以此推算长江中下游湖泊沉水植物每年固碳量 370602 tC/a, 长江中下游湖泊中仅沉水植物稳定的地质风化 CO<sub>2</sub> 汇量约为 75 万吨。从而证明岩溶碳汇的相对稳定性和岩溶动力系统新理论的合理性。

**关键词:** 地质碳汇; 稳定性; 草海; 水生植物; 碳同位素

中图分类号: P597.2; P931.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.14

## The Stability of Carbon Sink Effect related to Carbonate Rock Dissolution: A Case Study of the Caohai Lake Geological Carbon Sink

ZHANG Qiang

*Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Karst Dynamics Laboratory,  
Ministry of Land and Resources/Guangxi Zhuang Autonomous Region, The International Research Center on Karst  
under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004*

**Abstract:** In recent years, there have been more and more debates concerning karst carbon sink or source, and the key problem is whether the bicarbonate from carbonate rock dissolution is stable. With the Caohai Lake basin as the study area, on the basis of previous researches, and by utilizing the carbon isotope model, the authors conducted studies and found that 58.8% of bicarbonate is utilized by aquatic plants. The Caohai basin geological carbon sink amount is 588.67 tC/a. Submerged plants of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River can fix 370602 tC/a of carbon, and this means that every year 750000 tons of CO<sub>2</sub> from geological weathering will be stabilized by submerged plants. So carbon sink effect related to carbonate rock dissolution is quite stable and the new karst dynamic system is rational.

**Key words:** geological carbon sink; stability; Caohai Lake; aquatic plants; carbon isotope

由于 CO<sub>2</sub> 等温室气体对环境的影响, 地球系统的碳循环成为全球变化的核心问题之一。碳循环是指碳在岩石圈、水圈、气圈和生物圈之间, 以 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>(以 CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub> 为主)、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、(CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>(有机碳)等形式相互转换和运移的过程。当前的研究是基于地圈、生物圈的相互作用(称为 International Geosphere Biosphere Program, 缩写

IGBP), 而对于各种地质作用(如活动断裂带及火山活动释放 CO<sub>2</sub>、陆地风化作用回收碳、碳酸盐岩变质释放碳等)对全球碳循环的影响, 则未予足够重视, 甚至有所忽略(袁道先, 2011)。

尽管如此, 最近十多年来, 人类对地质作用碳循环特别是岩溶地质碳汇的基础研究和交叉学科研究获得许多新的认识, 对传统认识提出了挑战。新

本文由中国地质调查局地质调查项目“地质碳汇潜力综合研究”(编号: 1212011087119)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: 2010-SYS-15)联合资助。

收稿日期: 2012-09-05; 改回日期: 2012-10-10。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 张强, 男, 1982年生。助理研究员。主要从事岩溶环境研究。通讯地址: 541004, 广西省桂林市七星路50号。E-mail: zhangq198203@163.com。

的研究表明岩溶地质作用是一种快速的碳汇过程, Science 在 2011 年 11 月 18 日对中国地质科学院岩溶地质研究所的研究做了报道(Christina, 2011), 但是很快 2012 年 2 月 10 日, 美国地球化学专家 Curl R L 在 Science 对岩溶碳汇提出了质疑, 他认为岩溶地质作用是一个碳迁移过程, 而不是碳汇(Curl, 2012)。这也代表了很大一部分人的观点, 认为岩溶地质过程是一个可逆的过程, 不存在一个汇, 溶蚀作用吸收  $\text{CO}_2$  气体产生的重碳酸根不稳定, 很快就会由于脱气作用释放出  $\text{CO}_2$ , 即岩溶作用的稳定性问题。岩溶作用是否如 Rane 所说, 是一个不稳定过程? 本文试图对其回答。

## 1 岩溶地质碳汇稳定性

传统的碳循环模型中把地质作用当做一种纯无机的过程, 追根溯源最早是 Berner(1983)提出的, 在此基础上, 人们做了大量研究, 从无机地质过程出发, 认为在地质时间尺度上, 碳酸盐化学风化并不产生净碳汇。在短时间尺度上, 虽然碳酸盐化学风化速率较硅酸盐快, 但对碳循环影响很小。其实在 Berner(1983)的文章中也提到了他的模型的局限性, 事实上自然界中纯无机的地质作用几乎不存在, 生物化学过程似乎是更加准确的表述。快速的有机参与的地质过程对于短时间地质碳循环而言是有重要影响的, 有机碳沉积碳库量并不是微不足道的, 这种碳的转换通过风化过程中的氧化和沉积过程中的流失可以影响地质历史时间尺度大气  $\text{CO}_2$  水平(Garrels et al., 1976), 同样, 生物过程也广泛参与岩溶作用, 例如碳酸酐酶可以加速岩溶作用(刘再华, 2001)。最近的研究表明, 水生植物光合作用可以吸收利用重碳酸根、把重碳酸根固定在水生植物中(刘再华, 2012; 蒋忠诚, 2012; 章程, 2011b; De Montety et al., 2011; 王华等, 2011), 也基于此, 刘再华(2012)改进了传统的岩溶动力系统(图 1)。

水生植物专家的研究也表明重碳酸根可以作为大型水生植物和藻类的无机碳源,  $\text{HCO}_3^-$  可以经过载体蛋白主动进入藻体细胞内( $\text{HCO}_3^-$  的直接转运), 或者经膜外 CA 催化作用, 加快  $\text{CO}_2$  的形成和提供速度( $\text{HCO}_3^-$  的间接吸收)(岳国峰等, 2003)。

水生植物可以同时利用  $\text{CO}_2$  或者  $\text{HCO}_3^-$  参与光合作用, 二者的比例取决于 CA 的活性和环境中无机碳存在的形式。在岩溶地区, 水体偏碱性、水体中无机碳以  $\text{HCO}_3^-$  为主要形式, 岩溶区地下河中  $\text{HCO}_3^-$  浓度可以常常高达 3~5 mmol/L, 岩溶区地表河流中  $\text{HCO}_3^-$  浓度也达 1~3 mmol/L, 在这种环境下

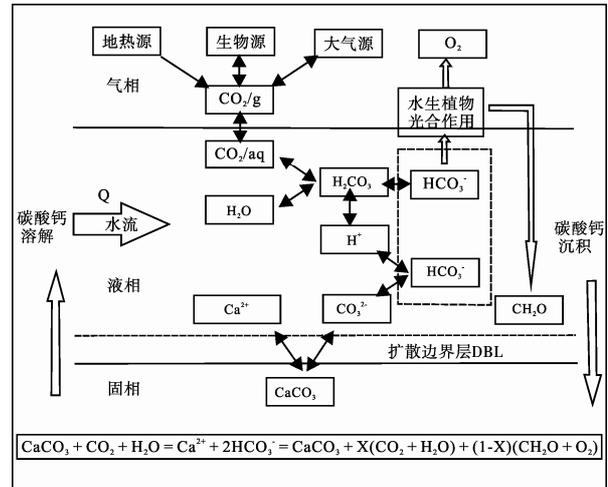


图 1 考虑水-岩-气-生相互作用的岩溶动力系统 (据刘再华, 2012)

Fig. 1 Karst dynamic system in consideration of water-rock-air-organisms (after LIU Zai-hua, 2012)

水生植物光合作用更多地选择利用  $\text{HCO}_3^-$ , 而不是大气中的  $\text{CO}_2$ 。水生植物固定  $\text{HCO}_3^-$  已经得到大多数专家的公认, 但是其利用率有多少还需要进一步研究, 如果有较高的利用率, 那么一方面可以进一步证明刘再华(2012)的改进模型、另一方面也可以说明岩溶碳汇的稳定性。

## 2 草海地质碳汇

草海位于贵州西部威县境, 地理坐标东经  $104^{\circ}10'$ — $104^{\circ}25'$ , 北纬  $26^{\circ}45'$ — $27^{\circ}00'$ 。该区地处云贵高原海拔 2170~2300 m 的河源地带。地质构造上位于北东向与北西向断裂、褶皱的交接复合部位, 区域地层岩性以下石炭统( $\text{C}_1$ )炭质页岩和灰岩及上石炭统( $\text{C}_2$ )碳酸盐岩为主。湖区外围喀斯特地形广泛分布, 高原地面起伏平缓。区内气候属山地温暖湿润季风气候, 年平均气温  $10.2^{\circ}\text{C}$ , 7 月平均气温最高为  $17.7^{\circ}\text{C}$ , 1 月最低为  $1.9^{\circ}\text{C}$ , 冬季长, 无夏季。年平均降雨量 950.9 mm, 干湿季节明显。5—10 月为雨季, 其降雨量占全年的 88%; 12 月至次年 3 月为旱季, 降雨量仅占年降雨总量的 5%。

根据草海自然保护区 1992 年规划调查资料(贵州省地质矿产勘查开发局, 2008), 现代草海湖沼面积枯水期为  $19.8\text{ km}^2$ , 丰水期为  $26\text{ km}^2$ , 湖盆汇水面积  $98.5\text{ km}^2$ 。湖沼盆底岩层倾角平缓, 以下石炭统( $\text{C}_1$ )下部炭质页岩及灰岩为主的隔水岩层广泛分布。但在草海盆缘斜坡及上游地区形成含水比较丰富的喀斯特裂隙含水层。地下水沿盆地边缘及低洼地带流出地表, 形成众多的喀斯特泉。湖沼盆底为地下水的地方性排泄基准面, 是草海盆地水文地质

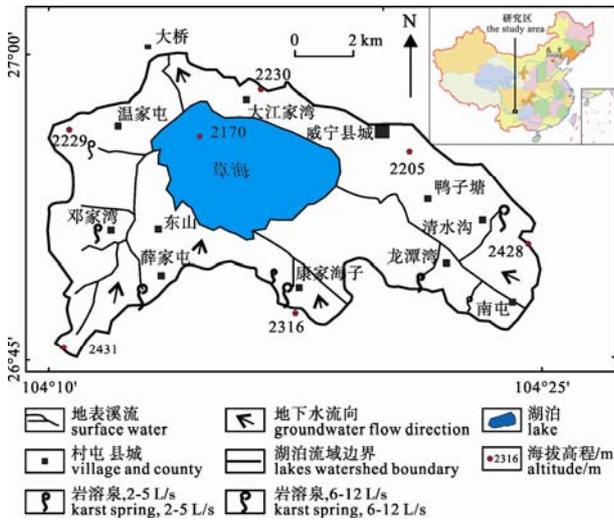


图 2 草海流域水文简图  
Fig. 2 Hydrologic diagram of the Caohai Lake

单元中地下水集中排出地表的场所。根据 1994 年 8 月中旬久旱不雨时调查的泉流量概算, 每天总共有近似枯季流量的 1.1 万 m<sup>3</sup> 地下水排入草海, 换句话说, 草海每年可获得约 400 万 m<sup>3</sup> 基流量补给(贵州地质矿产勘查开发局, 2008)。按该区多年平均降雨量 950.9 mm, 年径流深 550 mm 等参数综合考虑, 全区 98.5 km<sup>2</sup> 年产水量为 5417 万 m<sup>3</sup>。草海丰水期水域面积 26 km<sup>2</sup>, 按平均水深 1.5 m 计算, 其蓄水量为 3900 万 m<sup>3</sup>; 枯水期水域面积 19.8 km<sup>2</sup>, 水深 1.2 m, 蓄水量 2376 万 m<sup>3</sup>。

据保护区网站公布资料(刘国柱, 2010), 草海水体水化学性质见表 1。

草海湖水具有岩溶水特点, 重碳酸根为主要阴离子, 浓度约 108 mg/L, 以产水量 5417 万 m<sup>3</sup> 计算, 草海输入溶解无机碳总量为 1151 tC/a, 其中大气输入量仅 35.6 tC(陈毅凤, 2001), 草海湖泊系统中的无机碳主体为碳酸盐风化产生的重碳酸根。

表 1 草海水体基本水化学特征  
Table 1 Basic water chemical characteristics of the Caohai Lake

项目	对应值
水温	17.2
pH	8
Ca <sup>2+</sup> 平均浓度	60.82 mg/L
Mg <sup>2+</sup> 平均浓度	3.633 mg/L
K <sup>+</sup> 平均浓度	2.200 mg/L
Na <sup>+</sup> 平均浓度	3.483 mg/L
Cl 平均浓度	5.625 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 平均浓度	65.695 mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 平均浓度	108 mg/L
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 平均浓度	0.218 mg/L

表 2 草海水生植物生物量及同位素特征  
(据陈毅凤, 2001; 张军, 1995)  
Table 2 Aquatic plant biomass and isotope characteristics of the Caohai Lake (after CHEN, 2001; ZHANG, 1995)

水生植物类型	干重占全湖生物量比重/%	$\delta^{13}C/‰$	水生植物固碳量/(tC/a)
沉水植物	77	-16.5	630.3
挺水植物	17	-27	139
浮水植物	4	-20.3	32.7
其他	2		16.4

陈毅凤(2001)调查草海水生植物生物量以及张军(1995)研究草海水生植物碳同位素特征见表 2。

在草海水生植物光合作用中, 固定的无机碳一部分来源于 CO<sub>2</sub>, 一部分来源于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 两者的比例多少可以利用简单的二端元模型来计算:

$$\delta T = \delta A - fB\delta A + fB\delta B$$

其中  $\delta T$  为被考察植物叶片的碳同位素值,  $\delta A$  为基本不利于碳酸氢根离子作无机碳源、碳酸酐酶活性极低的植物的叶片的  $\delta^{13}C$  值,  $\delta B$  为极少利用二氧化碳作碳源以碳酸氢根离子为主要无机碳源的微藻的  $\delta^{13}C$  值,  $fB$  为植物利用碳酸氢根离子占无机碳源比例。

该方法为吴沿友 2011 年的专利, 基本原理为重碳酸根参与光合作用的比例取决于碳酸酐酶活性, 碳酸酐酶活性与环境相关, 碳酸酐酶活性与植物碳同位素值显著正相关。在其文章中, 两个端元分别为: 不利于碳酸氢根的悬铃木叶片为 -31.56‰, 极少利用二氧化碳的小球藻为 -22.74‰, 碳酸酐酶对植物同位素分馏作用在 8.82% 左右(吴沿友, 2011)。

在本研究区, 周围植物多喀斯特植被, 贵州喀斯特山区植物叶片碳同位素变化范围为 -26.98‰ ~ -29.15‰ 平均值为 -28.14‰(杨成, 2007; 刘占成等, 2010; 杨涛等, 2005; 宁有丰等, 2005)。取两个端元为 -28.14‰ ~ -19.32‰, 据此计算水生植物吸收利用碳酸氢根离子占无机碳源的比重(表 3)。

由数据可以看出, 沉水植物比值大于 100%, 其原因是端元的选择是存在偏差, 本研究拟定大于 100% 的视为 100%, 小于 0 的视为 0。由此计算草海

表 3 草海水生植物利用碳酸氢根离子占无机碳源的比重  
Table 3 Bicarbonate utilization capacity among some plants species in the Caohai Lake

	$\delta T/‰$	$\delta A/‰$	$\delta B/‰$	fB/%
草海沉水植物	-16.5	-28.14	-19.32	131.97
草海挺水植物	-27	-28.14	-19.32	12.93
草海浮水植物	-20.3	-28.14	-19.32	88.89

表 4 草海水生植物固定重碳酸根碳量  
Table 4 Aquatic plants fixed carbon from bicarbonate in the Caohai Lake

	水生植物固碳量/(tC/a)	fB/%	光合作用固定重碳酸根的碳量/(tC/a)
草海沉水植物	630.3	100	630.30
草海挺水植物	139	12.93	17.97
草海浮水植物	32.7	88.89	29.07
合计			677.33

水生植物吸收利用重碳酸根碳总量达到 677.33 tC/a(见表 4), 占草海输入的无机碳总量为 1151 tC/a 的 58.8%。其余溶解无机碳则存留于湖水中(约 500 tC/a)或者脱气。该结果与前人的计算结果类似: 桂林丫吉泉碳酸氢根 70%以上被水生藻类光合作用固定(Liu et al., 2008), 增江悬移质中的有机碳以水生藻类(内源碳)的贡献为主(>70%)(陶贞, 2004)。由此可见地质风化作用产生的重碳酸根并没有人们想象中的那么不稳定。60%~70%的重碳酸根可以被水生植物光合作用固定下来, 再加上水体中存留的溶解态无机碳, 由于脱气作用造成的不稳定性碳酸氢根离子所占比重可能不大。

草海流域补给区多为岩溶区, 其水体中碳酸氢根主要来源于岩溶作用。假设重碳酸根中碳一半源于大气, 一半源于碳酸盐。据此可以计算出草海流域每年地质碳汇量(溶蚀回收大气  $\text{CO}_2$  碳量)中固定于水生植物中的碳可以达到 338.67 tC/a, 存留于水体中的碳达到 250 tC/a, 则草海流域比较稳定的岩溶碳汇量可以达到 588.67 tC/a。

### 3 长江流域中下游湖泊地质碳汇

长江是我国第一大河, 流域面积 180 万  $\text{km}^2$ , 约占中国国土面积的 1/5, 分布着数千个湖泊, 全流域湖泊总面积达到 1.52 万  $\text{km}^2$ , 接近全国湖泊总面积的 1/5。长江中下游流域是中国淡水湖泊分布最集中的地区。全国五大淡水湖泊除洪泽湖外, 其余均在这个区域。目前本区湖泊总面积达 1.41 万  $\text{km}^2$ , 约占长江流域湖泊总面积的 93%, 约占全国湖泊总面积的 15%(赵济等, 1999)。除少数大型湖泊如鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖外, 大部分湖泊是中型湖泊(面积在 100~500  $\text{km}^2$ ), 和小型湖泊(面积小于 100  $\text{km}^2$ )。

王海军等(2007)于 2001 年 12 月至 2007 年 4 月, 调查了 46 个中小浅水湖泊, 总面积 1600  $\text{km}^2$ , 沉水植物生物量(鲜重)831  $\text{g}/\text{m}^2$ 。则总生物量(鲜重)可以达到 133 万 t/a, 按照烘湿比 7.68%, 水生植物平均含碳量 49.7%计算, 固碳量达到 50765 tC/a。

洞庭湖面积 3927  $\text{km}^2$ , 水生植被固碳强度平均达到 2.694  $\text{t}/\text{hm}^2$ (康文星, 2009), 则总固碳量可以达到 166743 tC/a。

鄱阳湖面积 3027  $\text{km}^2$ , 沉水植物生物量(鲜重)2008  $\text{g}/\text{m}^2$ , 则总生物量(鲜重)可以达到 380 万 t/a(李仁东等, 2001)。按照烘湿比 7.68%, 水生植物平均含碳量 49.7%计算, 固碳量达到 145044 tC/a。

太湖面积 2338  $\text{km}^2$ , 东太湖沉水植物平均生物量 689  $\text{g}/\text{m}^2$ , 年生物量 15.72 万 t/a, 西太湖沉水植物生物量 400~3322  $\text{g}/\text{m}^2$ , 年生物量 4.98 万 t/a(鲍建平等, 1991)。太湖沉水植物年产量 20.7 万 t/a。按照烘湿比 7.68%, 水生植物平均含碳量 49.7%计算, 固碳量约 7901 tC/a。

巢湖面积 770  $\text{km}^2$ , 沉水植物总生物量 3910.8 t(卢心固, 1984), 按照烘湿比 7.68%, 水生植物平均含碳量 49.7%计算, 固碳量约 149 tC/a。

依据前人研究成果推算, 长江中下游湖泊沉水植物固碳总量可以达到 370602 tC/a, 按照本文草海的研究结果, 沉水植物光合作用无机碳源全部是重碳酸根, 长江中下游湖泊沉水植物固定重碳酸根碳量即为 370602 tC/a。据前人研究, 长江河水中  $\text{HCO}_3^-$  的平均浓度为 1.63  $\text{mol}/\text{m}^3$ , 其中碳酸盐本身风化溶解贡献约 45%的  $\text{HCO}_3^-$ , 55%的  $\text{HCO}_3^-$  是在岩石风化作用消耗的大气  $\text{CO}_2$ (李晶莹等, 2003), 则长江中下游湖泊中仅沉水植物固定的地质风化  $\text{CO}_2$  汇量约为 75 万吨。

### 4 结论

草海流域每年 DIC 产出量为 1151 tC/a, 其中 58.8%(677.33 tC/a)固定于水生植物。草海流域相对比较稳定的地质碳汇量达到 588.67 tC/a。其中 338.67 tC/a 通过光合作用转化为有机碳, 以此推算长江中下游湖泊沉水植物每年固碳量 370602 tC/a, 长江中下游湖泊中仅沉水植物固定的地质风化  $\text{CO}_2$  汇量约为 75 万吨。由此可见岩溶溶蚀过程产生的重碳酸根并非传统意义上的不稳定体, 其可以转换为

相对比较稳定的有机质,这也用野外实际数据证明的岩溶碳汇的稳定性,说明了刘再华(2012)改进后的岩溶动力系统的合理性。我国岩溶面积超过300万 $\text{km}^2$ ,占国土面积近三分之一,由于岩溶过程产生的地质碳汇量相当可观。其中在新的岩溶动力系统指导下,重新计算岩溶碳汇量,其数量将大大增加,其意义也十分重大。

## 参考文献:

- 鲍建平, 缪为民, 李劫夫, 张洪宝. 1991. 太湖水生维管束植物及其合理开发利用的调查研究[J]. 大连水产学院学报, 6(1): 13-20.
- 陈毅凤, 张军, 万江国. 2001. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J]. 湖泊科学, 13(1): 15-19.
- 贵州省地质矿产勘查开发局. 2008. 草海流域水文地质环境及水资源初步研究[EB/OL]. [2008-12-19]. <http://www.gzdk.com/dkj/144964011052498944/20081219/143354.html>.
- 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 2012. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报, 33(2): 129-134.
- 康文星, 田徽, 何介南, 席宏正, 崔莎莎, 胡燕平. 2009. 洞庭湖湿地植被系统的碳贮量及其分配[J]. 水土保持学报, 23(6): 129-148.
- 李晶莹, 张经. 2003. 长江南通站含沙量及水化学变化与流域的风化过程[J]. 长江流域资源与环境, 12(4): 363-369.
- 李仁东, 刘纪远. 2001. 应用 Landsat ETM 数据估算鄱阳湖湿生植被生物量[J]. 地理学报, 56(5): 532-540.
- 刘国柱, 谢峰, 涂成龙. 2010. 草海水体的理化性质及其污染状况检测与研究[OL]. [2010-08-13]. <http://www.caohaibhq.com/Operation.asp?ID=53>.
- 刘再华. 2001. 碳酸酐酶对碳酸盐岩溶解的催化作用及其在大气 $\text{CO}_2$ 沉降中的意义[J]. 地球学报, 22(5): 477-480.
- 刘再华. 2012. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. 科学通报, 57(2-3): 95-102.
- 刘占成, 王安建, 于汶加, 李铭. 2010. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 31(5): 727-732.
- 卢心固. 1984. 巢湖水生植被调查[J]. 安徽农学院学报, 2: 95-102.
- 宁有丰, 刘卫国, 安芷生. 2005. 植物-土壤有机质转化过程中的碳同位素组成变化[J]. 地球学报, 26(S1): 236.
- 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 沈承德, 邬俏钧, 吴志才, 刘冠超. 2004. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量[J]. 环境科学学报, 24: 789-795.
- 王海军. 2007. 长江中下游中小型湖泊预测湖沼学研究[D]. 武汉: 中国科学院.
- 王华, 张春来, 杨会, 曹建华, 张强, 唐伟, 应启和, 林宇. 2011. 利用稳定同位素技术研究广西桂江流域水体中碳的来源[J].

地球学报, 32(6): 691-698.

- 吴沿友, 邢德科, 刘莹. 2011. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. 地球与环境, 39(2): 273-277.
- 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 刘占民, 郑厚义. 2007. 贵州喀斯特山区植物叶片碳同位素组成研究[J]. 地球与环境, 35(1): 33-38.
- 杨涛, 蒋少涌, 赖鸣远, 杨競红, 凌洪飞, 吴能友, 黄永祥, 刘坚, 陈道华. 2005. 海洋沉积物孔隙水中溶解无机碳(DIC)的碳同位素分析方法[J]. 地球学报, 26(S1): 51-52.
- 袁道先. 2011. 地质作用于碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 56(26): 2157.
- 岳国峰, 王金霞, 朱明远, 周百成. 2003. 藻类无机碳营养的研究进展(II)[J]. 海洋科学, 27(6): 31-34.
- 张军. 1995. 草海湖泊系统碳稳定同位素地球化学及其碳循环的简单模式(摘要)[J]. 地质地球化学, 6: 117-119.
- 章程. 2011. 岩溶作用时间尺度与碳汇稳定性[J]. 中国岩溶, 30(4): 368-371.
- 赵济, 陈传康. 1999. 中国地理[M]. 北京: 高等教育出版社.

## References:

- BAO Jian-pin, MIAO Wei-min, LI Jie-fu, ZHANG Hong-bao. 1991. Preliminary Study on the Aquatic Weeds of the Tai Lake and Their Rational Development and Utilization[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 6(1): 13-20(in Chinese with English abstract).
- BERNER R A, LASAGA A C, GARRELS R M. 1983. The Carbonate-silicate Geochemical Cycle and Its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide Over the Past 100 Million Years[J]. American Journal of Science, 283(7): 641-683.
- Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province. 2008. The Lake Caohai basin hydrogeology environment and preliminary research of water resources [EB/OL]. [2008-12-19]. <http://www.gzdk.com/dkj/144964011052498944/20081219/143354.html>(in Chinese).
- CHEN Yi-feng, ZHANG Jun, WAN Guo-jiang. 2001. A Simple Carbon Cycle Model of Lake Caohai, Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences, 13(1): 15-19(in Chinese with English abstract).
- CHRISTINA L. 2011. An Unsung Carbon Sink[J]. Science. 334: 886-887.
- CURL R L. 2012. Carbon shifted but not sequestered[J]. Science, 335(6069): 655.
- DE MONTETY V, MARTIN J B, COHEN M J, FOSTER C, KURZA M J. 2011. Influence of diel biogeochemical cycles on carbonate equilibrium in a karst river[J]. Chemical Geology, 283(1-2): 31-43.
- GARRELS R M, LERMAN A, MACKENZIE F T. 1976. Controls

- of atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>: past, present and future[J]. *American Scientist*, 64(3): 306-315.
- JIANG Zhong-cheng, YUAN Dao-xian, CAO Jian-hua, QIN Xiao-qun, HE Shi-yi, ZHANG Cheng. 2012. A Study of Carbon Sink Capacity of Karst Processes in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(2): 129-134(in Chinese with English abstract).
- KANG Wen-xing, TIAN Hui, HE Jie-nan, XI Hong-zheng, CUI Sha-sha, HU Yan-ping. 2009. Carbon Storage of the Wetland Vegetation Ecosystem and Its Distribution in Dongting Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(6): 129-148(in Chinese with English abstract).
- LI Jing-ying, ZHANG Jing. 2003. Variations of solid content and water chemistry at Nantong station and weathering processes of the Changjiang watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 12(4): 363-369(in Chinese with English abstract).
- LI Ren-dong, LIU Ji-yuan. 2001. An Estimation of Wetland Vegetation Biomass in the Poyang Lake Using Landsat ETM Data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 56(5): 532-540(in Chinese with English abstract).
- LIU Guo-zhu, XIE Feng, TU Cheng-long. 2010. Investigation on the Physicochemical Properties and the Pollution of the Water of Caohai[OL]. <http://www.caohaibhq.com/Operation.asp?ID=53>(in Chinese).
- LIU Z H, LIU X L, LIAO C J. 2008. Daytime deposition and nighttime dissolution of calcium carbonate controlled by submerged plants in a karst spring-fed pool: insights from high time-resolution monitoring of physico-chemistry of water[J]. *Environmental Geology*, 55(6): 1159-1168.
- LIU Zai-hua. 2001. The Role of Carbonic Anhydrase as an Activator in Carbonate Rock Dissolution and Its Significance in Atmospheric CO<sub>2</sub> Precipitation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(5): 477-480(in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua. 2012. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(2-3): 95-102(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhan-cheng, WANG An-jian, YU Wen-jia, LI Ming. 2010. Research on Regional Carbon Emissions in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(5): 727-732(in Chinese with English abstract).
- LU Xin-gu. 1984. Aquatic vegetation survey in the Chaohu lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, (2): 95-102(in Chinese).
- NING You-feng, LIU Wei-guo, AN Zhi-sheng. 2005. Carbon Isotopic Variation of the Organic Matter During the Plant-Soil Transformation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(S1): 236(in Chinese with English abstract).
- TAO Zhen, GAO Quan-zhou, YAO Guan-rong, SHEN Cheng-de, WU Qiao-jun, WU Zhi-cai, LIU Guan-chao. 2004. The sources, seasonal variation and transported fluxes of the riverine particulate organic carbon of the Zengjiang River, Southern China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24(5): 789-795(in Chinese with English abstract).
- WANG Hai-jun. 2007. Predictive Limnological Researches on Small-to Medium-Sized Lakes Along the Mid-Lower Yangtze River[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Hua, ZHANG Chun-lai, YANG Hui, CAO Jian-hua, ZHANG Qiang, TANG Wei, YING Qi-he, LIN Yu. 2011. The Application of Stable Carbon Isotope to the Study of Carbon Sources in Guijiang Watershed, Guangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(6): 691-698(in Chinese with English abstract).
- WU Yan-you, XING De-ke, LIU Ying. 2011. The Characteristics of Bicarbonate Used by Plants[J]. *Earth and Environment*, 39(2): 273-277(in Chinese with English abstract).
- YANG Cheng, LIU Cong-qiang, SONG Zhao-liang, LIU Zhan-min, ZHENG Hou-yi. 2007. Carbon isotope compositions of plant leaves from karst mountainous area, Guizhou, China[J]. *Earth and Environment*, 35(1): 33-38(in Chinese with English abstract).
- YANG Tao, JIANG Shao-yong, LAI Ming-yuan, YANG Jing-hong, LING Hong-fei, WU Neng-you, HUANG Yong-yang, LIU Jian, CHEN Dao-hua. 2005. An Analytical Method for Carbon Isotopic Composition of Dissolved Inorganic Carbon (DIC) in Pore Waters from Marine Sediments[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(S1): 51-52(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 2011. Foreword for the special topic "Geological Processes in Carbon Cycle"[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(35): 3741-3742.
- YUE Guo-feng, Wang Jin-xia, ZHU Ming-yuan, ZHOU Bai-cheng. 2003. Progress of Inorganic Carbon Acquisition by Algae(II): Mechanism and Regulation[J]. *Marine Science*, 27(6): 31-34(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng. 2011. Time-scale of karst processes and the carbon sink stability[J]. *Carsologica Sinica*, 30(4): 368-371(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jun. 1995. The lake Caohai system stable carbon isotopic geochemical and its carbon cycle simple model (the Abstract)[J]. *Geology-Geochemistry*, (6): 117-119(in Chinese).
- ZHAO Ji, CHEN Chuan-kang. 1999. *China Geography*[M]. Beijing: Higher Education Press(in Chinese).