

文章编号:1001-4810(2007)03-0202-05

# 基于碳酸盐岩风化的碳源分析及土壤的影响作用机制

朱明秋, 曾建华, 郭芳

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:**在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -岩石系统中由于碳酸盐岩的可溶性,使其回收土壤/大气 $\text{CO}_2$ 的通量比硅酸盐岩更大。通过大陆河流湖泊 $\text{HCO}_3^-$ 来源和海洋碳来源两种计算方式得出,碳酸盐岩溶解回收大气 $\text{CO}_2$ 的量是其它岩类的3倍以上。与同纬度地带性土壤相比,岩溶地区土壤通过促进土下碳酸盐岩的溶解与固碳作用对大气 $\text{CO}_2$ 产生更为强烈的汇效应;土壤的覆盖使土下碳酸盐岩的溶蚀速率平均提高4.35倍,从而加快了对土壤/大气 $\text{CO}_2$ 的回收速率;富钙的土壤地球化学背景使石灰土富含胡敏酸钙,胡敏酸在土壤中的存留时间长达780~3000年,是其它类型土壤有机质如富里酸的4~5倍,稳定的胡敏酸钙使土壤有机碳稳定性增加、周转周期延长而得以累积,固碳作用将减少土壤 $\text{CO}_2$ 向大气的排放。石灰土的平均有机质含量比同纬度红壤、黄壤分别提高了44%、33%,固碳作用十分明显。

**关键词:**岩溶地区;碳酸盐岩溶解;碳转移;土壤固碳作用

**中图分类号:**X141 **文献标识码:**A

## 0 前言

碳酸盐岩溶解在地质历史过程中对大气 $\text{CO}_2$ 的减少作出了巨大的贡献<sup>[1,2]</sup>,原始地球大气中的 $\text{CO}_2$ 含量占25%<sup>[3]</sup>,是当今大气中 $\text{CO}_2$ 含量的800多倍。随着地球的演变、生命的演化,蕴藏在碳酸盐岩中的碳达 $61 \times 10^{15} \text{t}$ <sup>[4]</sup>,占全球碳总量的99.55%。由于碳酸盐岩在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -岩石系统中的可溶性和其分布的广泛性,使现代岩溶作用与全球碳循环保持密切的关系<sup>[5,6]</sup>,已有研究表明碳酸盐岩的溶蚀,每年消耗大气 $\text{CO}_2$ 的量为6.08亿t,约占“missing carbon”的1/3<sup>[6]</sup>,可见岩溶动力系统作为地球表层系统的重要组成部分,在全球碳循环的过程中有着重要的作用。

土壤是陆地生物生存、物质循环最为活跃的场所以<sup>[7,8]</sup>,在土壤环境中活跃的生物作用使土壤中产生比大气高几十倍、几百倍的 $\text{CO}_2$ 浓度和大量的生物衍生物(尤其是有机酸、螯合物),加剧了对碳酸盐岩的

侵蚀作用。尽管有机酸对碳酸盐岩的溶解会释放出 $\text{CO}_2$ ,但碳酸盐岩在被侵蚀的过程中不断消耗土壤空气中的 $\text{CO}_2$ ,最终减少土壤 $\text{CO}_2$ 向大气的排放。碳酸盐岩遭侵蚀风化后,酸不溶物残留形成土壤,其富钙的岩溶地球化学背景,使土壤中的腐殖酸与钙结合,形成稳定的腐殖酸钙,造成大气 $\text{CO}_2$ 经生物循环进入土壤后的周转周期延长<sup>[9]</sup>,对大气 $\text{CO}_2$ 汇效应影响作用更为明显。这也是矿质元素对土壤有机碳稳定性影响的典型研究之一<sup>[10]</sup>。本文在吸收前人研究成果的基础上,就岩溶地区土壤对大气 $\text{CO}_2$ 的汇效应作一阐述。

## 1 基于碳酸盐岩风化的碳源分析

### 1.1 基于大陆河流、湖泊中 $\text{HCO}_3^-$ 来源的分析计算

碳酸盐岩在全球大陆的分布面积为2200万 $\text{km}^2$ ,占陆地面积的15%<sup>[11]</sup>,但从存在于大陆河流、湖

基金项目:国家自然科学基金项目(编号40372116,40231008)和广西壮族自治区科技厅项目(编号:桂科自0640208)  
第一作者简介:朱明秋(1962-),女,学士,工程师,主要从事土壤地球化学、岩溶环境工程研究及科技管理工作。  
收稿日期:2007-05-20

泊中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的来源看,有38%来自于碳酸盐岩的风化,45%来自于硅酸盐岩的风化,17%来自于蒸发岩的溶解<sup>[2]</sup>。如果从单位面积来考察(表1),则碳酸盐岩溶解对大陆河流、湖泊中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的单位面积贡献率是其它岩类的3.51倍;碳酸盐岩风化回收大气CO<sub>2</sub>的量与流域排碳总量的相关系数也远高于硅酸盐岩风化回收大气CO<sub>2</sub>的量与流域排碳总量的相关系数(图1)。可见,岩溶地区大陆风化对土壤/大气CO<sub>2</sub>的回收效应之明显。

表1 碳酸盐岩与其它岩类风化对大陆河流、湖泊中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>来源的贡献率(据F. G. Ferris 等,1994)

Tab.1 Comparison the HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> contribution to river water and lake water from carbonate rock solution and other rocks'solution with per proportion (From F. G. Ferris et al 1994)

| 项 目                                     | 碳酸盐岩  | 其它岩类  |
|---|-------|-------|
| 占陆地面积比例(%)                              | 15    | 85    |
| 占HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 来源的比重(%) | 38    | 62    |
| 单位面积贡献率                                 | 2.53K | 0.72K |

注:表中K为大陆河流、湖泊中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的来源总量与大陆总面积之比。

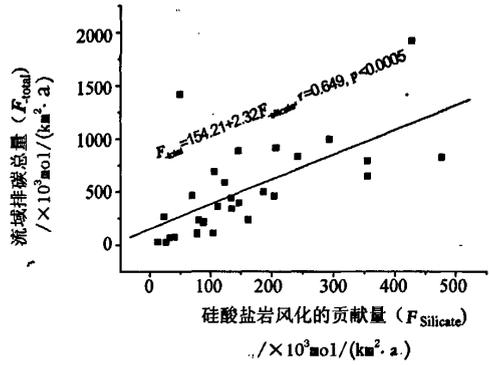
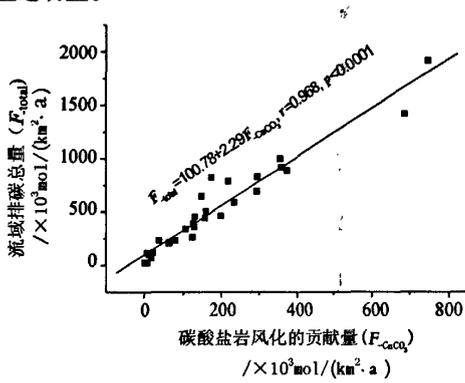


图1 大陆河流流域中碳酸盐岩、硅酸盐岩风化HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的贡献量与流域排碳总量的相关性 (据J-L Boeglin 等,1998)

Fig.1 The correlation between the total carbon amounts of river watersheds and the HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> amounts originated by the weathering of carbonate rocks(right figure) and silicate rocks(left figure) (Form J-L Boeglin et al,1998)

### 1.2 基于海洋中的C源分析计算

据Ludwig-W. et al(1996)估算,从大陆河流向海洋排泄的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>总量320tgC中有180tgC是来自碳酸盐岩地区,这相当于岩溶地区碳酸盐岩风化回收大气

CO<sub>2</sub>的量为90tgC<sup>[12]</sup>。从单位面积碳酸盐岩溶解回收大气CO<sub>2</sub>通量的比率来看,是其它岩类的3.63倍(表2)。

表2 单位面积碳酸盐岩溶解回收大气CO<sub>2</sub>通量的比率

Tab.2 Comparison of the CO<sub>2</sub> fluxes retrieved from the weathering of carbonate rocks and other rocks by per unit

| 项目  | 碳酸盐岩地区   | 其它岩类地区   |
|---|----------|----------|
| 大陆河流向海洋排泄的HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 总量(tgC) | 180      | 140      |
| 不同岩性区面积占陆地面积的比例(%)                              | 15       | 85       |
| 单位面积回收大气CO <sub>2</sub> 通量的比率                   | 600tgC/A | 165tgC/A |

注:表2中A为大陆总面积。

## 2 岩溶地区土壤对碳转移的影响作用机制

### 2.1 土壤覆盖对碳酸盐岩溶解的促进作用

根据我国西南岩溶区13个观测点的资料表明<sup>[6,13]</sup>,除了柳州、广州和贵阳外,地下碳酸盐岩的风化速率均大于地面碳酸盐岩的风化速率(图2),其风化速率平均提高4.35倍。这是因为土壤生物的活动使土壤环境中产生比大气高出几十、几百倍的CO<sub>2</sub>浓度和具有侵蚀性的有机酸、螯合物。模拟试验的结果

也显示,地下碳酸盐岩溶蚀回收土壤/大气CO<sub>2</sub>的量是硅酸盐岩的2.34倍<sup>[14]</sup>。因此,岩溶地区土壤覆盖条件下碳酸盐岩的风化能产生更强的大气CO<sub>2</sub>减汇效应。至于柳州、广州和贵阳地下碳酸盐岩溶蚀反而比地面的要低,这可能与这些地区大气的酸沉降有关,石灰土对酸雨沉降具有较强的缓冲能力<sup>[15]</sup>,当然不同生态环境条件下导致土壤环境水热状况、理化性质的差异也是原因之一。

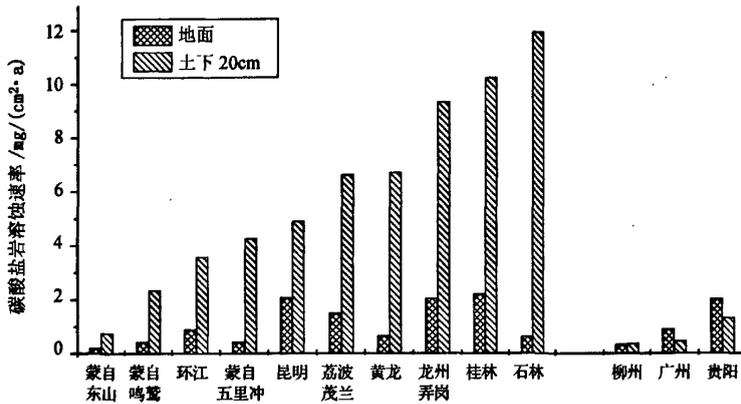


图2 我国西南岩溶区碳酸盐岩土下与地面溶蚀速率的对比

(图中蒙自东山、蒙自鸣鹭的资料据康彦仁,1995<sup>①</sup>;蒙自五里冲的资料据王珽,1997<sup>②</sup>)

Fig. 2 Comparison of the rate of carbonate rock dissolution on the surface and under the soil in Southwest China

2.2 土壤中腐殖质的稳定性与土壤的固碳作用

土壤腐殖质的形成与积累是土壤发育的重要特征之一,而土壤腐殖质的来源则是通过植物的新陈代谢及枯枝落叶分解重新合成。对西南岩溶地区枯枝落叶的化学组分的测定可知,同为常绿落叶阔叶混交林下,石灰土上枯枝落叶的CaO含量要比地带性红壤上的高3倍,而SiO<sub>2</sub>含量则仅为酸性土上的1/3~1/5(图3)。富钙的枯枝落叶和富钙的土壤环境使土壤腐殖质的形成和特征也具有富钙性和其它相应的特征。与同纬度地带性土壤相比,石灰土的有机质含量高。根据贵州省的土壤调查统计<sup>[16]</sup>,黑色石灰土有机质的平均含量为5.425%;棕色石灰土的有机质的平均含量为3.478%;黄色石灰土的有机质的平均含量为3.193%;红色石灰土有机质的平均含量为3.444%;比对应的红壤有机质平均含量2.721%、黄壤有机质

平均含量2.945%高(表3)。

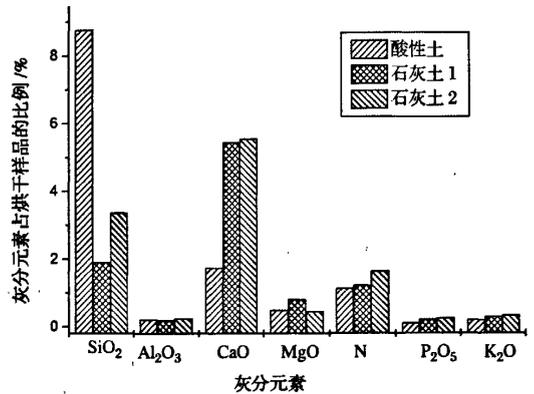


图3 石灰土与红壤上枯枝落叶的化学成分对比

Fig. 3 Comparison of chemical components between the limestone soil and the red soil in the same latitude

表3 石灰土与同纬度黄壤、红壤有机质含量的对比

Tab. 3 Comparison of the content of soil organic matter between the limestone soil and the yellow soil and red soil in the same latitude

| 指标 | 土类    | 红壤    | 黄壤    | 石灰土   |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |       |       |       | 红色石灰土 | 黄色石灰土 | 棕色石灰土 | 黑色石灰土 |
| 林地 | A层    | 4.518 | 5.002 | 5.122 | 5.225 | 4.462 | 8.169 |
|    | (样品数) | (44)  | (346) | (15)  | (123) | (6)   | (58)  |
| 草地 | B层    | 1.755 | 1.876 | 2.047 | 2.077 | 2.16  | 3.79  |
|    | (样品数) | (44)  | (334) | (15)  | (126) | (11)  | (35)  |
| 旱地 | A层    | 3.058 | 3.089 | 4.142 | 2.925 | 4.748 | 5.69  |
|    | (样品数) | (17)  | (948) | (5)   | (722) | (4)   | (31)  |
| 旱地 | B层    | 1.553 | 1.85  | 2.066 | 1.847 | 4.54  | 4.05  |
|    | (样品数) | (17)  | (761) | (5)   | (442) | (4)   | (28)  |

① 康彦仁等,南洞深埋型岩溶地下水系统的形成与演化研究,1995

② 王珽等,云南省蒙自五里冲水库枢纽区岩溶发育规律与水库运营关系研究,1997

土壤有机质主要由新鲜有机质、土壤腐殖质组成。土壤腐殖质可分为3类:富里酸、胡敏酸及胡敏素。不同类型的土壤有机质在土壤中存留的时间是不同的:植物残体中易分解的部分在土壤中的存留时间仅0.25年;新形成的土壤有机质在土壤中的存留时间为4.7~9年;富里酸在土壤中存留的时间200~630年;胡敏酸在土壤中存留的时间780~3000年;胡敏素是土壤腐殖质中最不活跃的部分,它与土壤粘土矿物牢固结合,其存留的时间更长<sup>[17]</sup>。

石灰土中腐殖质的组成特征是:胡敏酸在土壤腐

殖质中所占的比例高于富里酸,与同纬度黄壤、黄棕壤腐殖质相比,其胡敏酸/富里酸的比值较高(表4)。这是因为石灰土中的胡敏酸与钙结合生成不易分解的胡敏酸钙;而黄壤、黄棕壤中的腐殖质中的胡敏酸主要与 $R_2O_3$ 结合,形成活性胡敏酸,因此石灰土具有更高的有机碳的积累。

稳定的胡敏酸钙等使土壤有机碳稳定性增加、周转周期延长而得以累积,固碳作用将减少土壤 $CO_2$ 向大气的排放。

表4 石灰土土壤腐殖质的组成与同纬度黄壤、黄棕壤的对比

Tab. 4 Comparison of the components of soil humus between the limestone soil and the yellow soil and light brown soil in the same latitude

| 土壤类型  | 全碳/%  | 占全碳/% |       | 胡敏酸/富里酸 | 占胡敏酸总量/% |       |
|-------|-------|-------|-------|---------|----------|-------|
|       |       | 胡敏酸   | 富里酸   |         | 活性       | 钙结合   |
| 黄棕壤   | 13.44 | 5.9   | 31.2  | 0.19    | 99       | 1     |
| 黄壤    | 1.73  | 6.7   | 33.6  | 0.2     | 94.7     | 5.3   |
| 黑色石灰土 | 6.64  | 15.2  | 17.1  | 0.88    | 14.58    | 85.42 |
| 棕色石灰土 | 5.07  | 14.0  | 20.51 | 0.68    | —        | —     |

### 3 结 语

碳酸盐岩分布区的岩溶作用是对环境变化敏感的表层地质作用;由于碳酸盐岩的溶蚀使其回收大气 $CO_2$ 的通量比硅酸盐岩的更大;而土壤的覆盖可使碳酸盐岩的风化速率平均提高4.35倍。富钙的土壤地球化学背景使土壤胡敏酸与高浓度、高活性的钙结合形成较稳定的胡敏酸钙,导致石灰土中有机质的累积。与同纬度的红壤、黄壤相比,石灰土的平均有机质含量比同纬度红壤、黄壤分别提高了44%、33%,而在岩溶区普遍存在的棕色石灰土,其平均有机质含量比同纬度红壤、黄壤分别提高了45%、34%。因此石灰土通过两种机制对大气 $CO_2$ 产生积极的汇效应:促进土下碳酸盐岩的侵蚀,加速消耗大气中的 $CO_2$ ;延长土壤有机碳的周转周期,增加有机碳在土壤中的累积,减少土壤 $CO_2$ 向大气的排放量。

### 参考文献

- [1] R W Fairbridge. Advance on sedimentology — carbonate rock [C]//Carbonate rock and paleoclimate. Petrochemistry Industry Publisher, 1978, 232—255.
- [2] F G Ferris, R G Wiese, W S Fyfe. Precipitation of carbonate minerals by microorganisms; implications for silicate weathering and the global carbon dioxide budget[J]. Geomicrobiology Journal, 1994, 12:1—13.
- [3] C J Allegre, S H Schneider. The evolution of earth[J]. Science, 1995, (1): 23—31.
- [4] R A Houghton, G M Woodwell. Global climate change[J]. American Journal of Science, 1989, 260:18—26.
- [5] Yuan Daoxian. The carbon cycle in karst[J]. Z Geomorph N F Suppl—Bd, 1997, 108:91—102.
- [6] 刘再华. 大气 $CO_2$ 的两个重要的汇[J]. 科学通报, 2000, 45(21):2348—2351.
- [7] 赵其国. 土壤圈在全球变化中的意义与研究内容[J]. 地学前缘, 1997, 4(2):153—162.
- [8] 潘根兴, 曹建华 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J], 第四纪研究, 2000, 20(4):323—334.
- [9] 李忠, 叶炜.  $CO_2$ 在陆地生态系统与大气圈中的循环[A]. 土壤圈物质循环与农业和环境(C). 江苏科学技术出版社, 1993:114—127.
- [10] Margaret S Torn, Susan E Trumbore, Oliver A Chadwick. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover [J]. Nature, 1997, 389:170—173.
- [11] 王世杰, 季宏军, 欧阳自远. 碳酸盐岩风化成土的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5):441—449.
- [12] J. L Boeglin, J. L Probst. Physical and chemical weathering rates and  $CO_2$  consumption in a tropical lateritic environment; the upper Niger basin[J]. Chemical Geology, 1998, 148: 137—156.
- [13] 蒋忠诚, 蒋小珍, 雷明堂. 运用GIS和溶蚀试验数据估算中国岩溶区大气 $CO_2$ 的汇[J]. 中国岩溶, 2000, 19(3):212—217.
- [14] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 降雨对土壤 $CO_2$ 动态的影响及岩溶效应模拟研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2001, 26

(专辑):13-19.

- [15] 敖子强, 墨丽雅, 林文杰. 贵州鹿冲关和雷公山酸雨化学特征的对比研究[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 61-66.

- [16] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵州科技出版社, 1994: 86-116.

- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 中国农业出版社, 2000: 32-46.

## Analysis on the carbon amounts originated by the weathering of carbonate rocks and the influence of soils on the carbon turnover process in karst areas

ZHU Ming-qiu, CAO Jian-hua, GUO Fang

(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Carbonate rock in  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-rock}$  system can uptake more  $\text{CO}_2$  from soil or air than silicate rock due to dissolubility of the carbonate rock. The result calculated by using the  $\text{HCO}_3^-$  sources of continental rivers and lakes and carbon sources of the ocean indicates that the flux of  $\text{CO}_2$  reclaimed by carbonate dissolution is 3 times more than other rocks. Compared with the zonal soil of the same latitude, soil in karst area is of stronger carbon sink effect, for it can accelerate dissolution of carbonate rock and its ability of fixing carbon. The soil leads to denudation rate of carbonate rock increasing by 4.35 times, which accelerates the rate of uptake of  $\text{CO}_2$  from soil and air. On the other hand, the soil has rich organic carbon in the form of humic calcium which is firmly fixed in the soil because of the inertia of the humic calcium. Humic acid is accumulated in the soil for it could be easily combined with calcium that is abundant in karst area. The average content of soil organic matter in karst area is higher than the zonal soil of the same latitude by 44% and 33%, which leads to obvious effect for carbon fixation.

**Key words:** karst area; dissolution of carbonate rock; carbon translation; fixing carbon by soil

## 关于《中国岩溶》加入CEPS中文电子期刊服务的声明

思博网—中文电子期刊服务(CEPS)是目前台湾地区最大的期刊全文数据库。为了进一步扩大《中国岩溶》论文的学术影响范围,本刊已于日前正式加入思博网。读者可以通过 [www.ceps.com.tw](http://www.ceps.com.tw) 这一网址检索《中国岩溶》2007年起各期的论文全文,过一段时间之后,论文检索范围还可以回溯至2000年。

加入CEPS后,凡在《中国岩溶》上发表的论

文,将视作者已同意其论文为CEPS所收录、转载和在网发布;对于论文著作权使用费,我部将与印刷版稿酬一起计算,并作一次性付清。凡有不同意见将论文编入CEPS的作者,务请在来稿中事先声明,以便本刊进行适当处理。

请各位继续支持本刊工作,谢谢!

《中国岩溶》编辑部