

基于溶蚀试片法和 GEOAGENT 模型法的森林碳循环研究

——以重庆南川区金佛山为例^①

查瑞生, 匡鸿海

西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

摘要: 在对比溶蚀试片法、碳同位素法和 GEOAGENT 模型法等相关方法后, 选择溶蚀试片法为主要研究方法, 从金佛山森林生态系统的养分循环入手, 以簇叶新木姜子、水青冈和油茶 3 种植物为样本, 进行金佛山森林生态系统碳通量研究, 以碳同位素法为主要验证手段, 建立基于 GEOAGENT 的金佛山森林生态系统碳循环模型. 计算出金佛山森林碳汇量基础上, 从而认为南川碳汇交易可能性较小.

关键词: 森林碳循环; 溶蚀试片法; 金佛山

中图分类号: S7185

文献标志码: A

随着全球变化与陆地生态系统关系研究的深入, 以及联合国气候变化框架协议的实施, 陆地生态系统碳储量和碳平衡已成为国际生态学研究的热点^[1].

金佛山, 又名金山, 古称九递山, 属大娄山山脉, 由金佛、箐坝、柏枝三山等 108 峰组成, 总面积 1 300 km², 风景区规划面积 441 km², 保护区面积 522 km², 主峰风吹岭, 高 2 251 m, 是大娄山脉最高峰. 金佛山属典型的喀斯特地质地貌, 由于特殊的地理位置和气候条件, 在古老的时期, 缓冲了第四纪冰川的袭击, 较为完整地保持了古老而又不同地质年代的原始自然生态.

金佛山与周边森林分界清楚, 季相更替明显, 处于生长期的植被所占的郁闭度面积百分比很高, 是很好的区域森林碳循环研究对象. 西南大学对金佛山地区的森林观测已经有很好的基础. 金佛山地区地质作用导致的碳循环比较单纯, 主要表现在由岩溶作用所导致的碳收支失衡(金佛山地区脱气作用对碳循环影响不明显, 部分非碳酸盐岩嵌入地区碳通量比较小). 王冬银已经推算出由岩溶作用所导致的碳移动量相关模型^[2], 可以为本研究提供借鉴. 另外, 孙艳丽、况明生等已经以预埋试片的方式对金佛山土壤碳循环进行了初步研究^[3], 发现金佛山的湿地面积不多, 农业用地主要集中在森林边缘和廊道中, 没有明显的甲烷排放异常. 在已经得到的岩溶碳循环与土壤碳循环的碳移动量中, 有一部分缺失的碳移动量很可能就是森林碳汇抵消的份额. 因此, 作为碳酸盐岩地区的代表, 对金佛山森林碳循环进行研究可以得到金佛山碳循环模型, 为西南其他碳酸盐岩地区山地森林生态系统研究提供借鉴.

① 收稿日期: 2013-05-15

作者简介: 查瑞生(1987-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事资源与环境信息系统的研究.

通信作者: 匡鸿海, 副教授.

1 研究方法与实验过程

1.1 研究的技术方案(图 1)

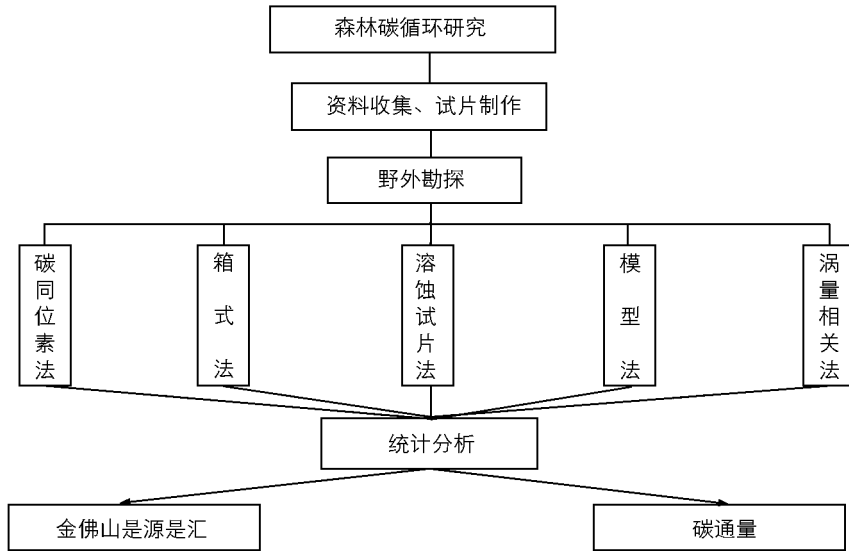


图 1 金佛山森林碳循环研究技术路线图

1.2 研究方法

1.2.1 溶蚀试片法

该方法是将统一制作的标准碳酸盐岩试片(通常为圆形,直径 4 cm,厚度 3~5 mm,表面积约 28~31 cm²,质量 10~25 g)放置于空中、土壤表面和土壤不同深度,一定时间(通常一个水文年)后取出称质量,从试片质量的减少来评价岩溶作用强度及其消耗的大气或土壤 CO₂ 量^[4]. 计算公式如下:

$$RS = 3.65 \times 10^{10} n(W_1 - W_2)/(A \times T)$$

式中:RS 为碳酸盐岩溶蚀或碳汇强度(mol/(km·a));n 为试片中碳酸盐的质量分数;W₁ 为试片初重(g);W₂ 为溶蚀后试片质量(g);T 为埋放时间(d);A 为试片表面积(cm²).

溶蚀试片法的优点是成本低且便于大量布设,结果可以以阈值的形式和涡量相关法相互验证.但由于岩溶土壤特殊的空间异质性(特别是土壤不连续),使得溶蚀试片埋放的代表性(需要大量的埋片实验才能获得有统计意义的结果)成为溶蚀试片法应用的重要障碍.

1.2.2 碳同位素技术

碳同位素技术方法是根据测定森林生态系统组成成分的碳同位素的比率来确定碳循环动态的方法^[5].森林植被通过光合作用固定的碳含有一定量的碳同位素,由于碳同位素的衰变,其质量分数的变化能反映森林生态系统中的碳元素的周转期,碳同位素的质量分数越低表示周转期越长,反之越短;另外,通过分析森林植被或土壤中碳同位素的丰度,还可确定森林植被或土壤中有机碳的年龄,由此可分析有机碳的动态变化.地面碳同位素方法在分析森林碳平衡时非常有效,结果精确,特别适于探讨森林碳循环动态的主导因子及其对全球变化的响应等方面,缺点在于取样与检测成本昂贵,而且将小范围的研究结果外推到区域甚至全球水平时,也会引起一定的误差.

1.2.3 模型法

近年来,模型研究是森林生态系统碳循环中的一个热点领域.模型模拟法是通过数学模型估算森林生态系统的生产力和碳蓄积,模型是研究大尺度森林生态系统碳循环的必要手段,在研究中曾产生过许多模型,主要可分为碳平衡模型、生物生理模型、生物地理模型和生物地球化学模型^[6].GEOAGENT 是目前

国外比较前沿的一个 GIS 分支。

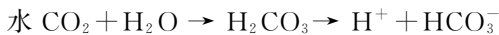
在充分分析了各方法的利弊后, 为了尽量保证研究结果的准确度, 并且充分考虑经费状况, 本研究决定采用多种方法并用, 相互验证分析的技术路线, 即采用溶蚀试片碳通塔设置法、碳同位素分析法 2 种方法作为主要技术方法。

1.3 实验原理及数据采集

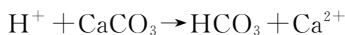
1.3.1 实验原理

碳酸盐分布地区, 当碳酸盐岩与含有 CO_2 的水相遇时, 岩溶作用就必将发生, 其化学反应过程如下:

空气 CO_2



岩层



即:



这就是地球表层碳酸盐岩地层中岩溶作用的基本原理^[7]。如果将碳酸盐岩磨制成质量已经且容易悬挂的试片挂在树枝上, 当植物的同化作用大于异化作用的时候, 呼吸作用就小于光合作用, 树冠间的二氧化碳浓度应该小于当地大气二氧化碳值。当植物的异化作用大于同化作用的时候, 呼吸作用就大于光合作用, 树冠间的二氧化碳浓度应该大于大气二氧化碳值。这样在树冠间悬挂的溶蚀试片质量就会发生变化。将每个植物上悬挂的溶蚀试片质量求平均值, 与原质量相比较, 观察其碳的移动。当二氧化碳浓度变大, 岩溶作用加剧, 试片的质量就应该变小。

根据碳酸盐岩的溶解方程, 可得到大气 CO_2 汇的计算公式^[8]:

$$F = E \times S \times R \times M_{\text{CO}_2} / M_{\text{CaCO}_3}$$

其中: F 为 CO_2 的汇, 单位 10^{10} g/a ; E 为溶蚀试片的溶蚀速度 ($\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$); S 为岩溶区面积, 单位 km^2 ; 溶蚀试片的碳酸盐岩纯度 R 为 0.97; CO_2 的分子量 M_{CO_2} 为 44; CaCO_3 的分子量 M_{CaCO_3} 为 100。

1.3.2 样品采集与试片制作

根据金佛山森林分布状况, 为了正确了解研究区碳通塔与碳通量分布特征, 本研究利用溶蚀试片法进行了 11 处溶蚀试片碳通塔设置, 因溶蚀试片丢失, 实际可用溶蚀试片碳通塔 5 处。

为了尽量保证研究结果的准确度, 并且充分考虑经费状况, 决定采用多种方法并用, 相互验证分析的技术路线, 即采用溶蚀试片碳通塔法和碳同位素分析法 2 种方法作为主要技术方法。

1.3.3 碳通塔设置

首先选择比较背风的区域设置碳通塔, 因为背风的地区空气流动相对较小, 对二氧化碳的浓度影响较小。其次, 要选择高度合适的植被, 太高的植被上部空气流动大没有研究意义, 太低的植被空气流动变化也太大, 可能造成结果的不精确^[9]。最后, 在选择好合适的树木后, 要将树木的各个部分进行试片悬挂, 尽量做到兼顾植物的各个部分。

2 金佛山碳循环研究

2.1 金佛山溶蚀试片碳通塔研究

本研究利用溶蚀试片法共进行了 11 处溶蚀试片碳通塔设置, 因部分溶蚀试片丢失, 实际可用的溶蚀试片碳通塔只剩 5 处, 具体位置如表 1。

根据以上碳通塔, 每月测定一次各塔所有试片的质量平均值(试片原始质量为 25 g), 从表 1 中我们发现所有碳通塔溶蚀试片的平均质量都增加了, 这表明金佛山地区 CO_2 是由大气进入森林的, 金佛山是碳汇。

表 1 金佛山溶蚀试片碳通塔位置分布

编 号	纬 度	经 度
金佛山 1 号	N 29° 5' 43.05"	E 107° 12' 11.8"
金佛山 2 号	N 29° 5' 50.34"	E 107° 12' 12.25"
金佛山 3 号	N 29° 6' 0.71"	E 107° 12' 16.7"
金佛山 4 号	N 29° 5' 58.35"	E 107° 12' 23.09"
金佛山 5 号	N 29° 5' 57.20"	E 107° 12' 29.27"

在以上研究的基础上,我们可以得到表 2.

表 2 2010 年金佛山溶蚀试片质量变化数据表

g

月份	1 号塔	2 号塔	3 号塔	4 号塔	5 号塔
1	25.201	25.024	25.013	25.117	25.331
2	25.334	25.299	25.319	25.119	25.434
3	25.499	25.571	25.331	25.226	25.349
4	25.502	25.599	25.619	25.331	25.449
5	25.119	25.387	25.214	25.445	25.435
6	25.535	25.671	25.575	25.311	25.521
7	25.792	25.715	25.715	25.235	25.989
8	25.511	25.391	25.439	25.239	25.921
9	25.619	25.529	25.601	25.271	25.776
10	25.912	25.815	26.101	25.589	25.237
11	25.109	25.388	25.223	25.625	25.309
12	25.133	25.325	25.421	25.889	25.393

由表 2 可知,金佛山碳通塔中的溶蚀试片在 1—11 月变化基本一致,在 4 月和 10 月达到最大,这和当地植被的生物通量基本吻合.试片质量变化区别较大的是 11—12 月,有的上升有的下降,这是因为 11—12 月金佛山植被生长状况区别比较大.

此外,我们还选取了簇叶新木姜子、水青冈和油茶 3 种植物,同样采用溶蚀试片法后得到表 3.

表 3 簇叶新木姜子、水青冈、油茶溶蚀试片质量变化数据表

g

月 份	簇叶新木姜子	水青冈	油 茶
1	25.119	25.011	25.009
2	25.223	25.133	25.130
3	25.356	25.203	25.198
4	25.345	25.311	25.210
5	25.366	25.322	25.301
6	25.555	25.323	25.312
7	25.432	25.325	25.370
8	25.339	25.401	25.401
9	25.399	25.221	25.301
10	25.311	25.331	25.302
11	25.299	25.319	25.313
12	25.299	25.289	25.287

由表 3 可知,簇叶新木姜子的碳通塔溶蚀试片的质量变化最大,这是由于其所处的位置比较高,气体变换量比较大;试片质量在 7 月变化最大,与植物生长期吻合.

2.2 金佛山碳同位素研究

本方法是利用碳同位素指示剂埋藏于植物根部,在植物枝干上套上塑料袋(人造气室,内含已经测试过的碳酸盐岩石试片),因碳同位素被植物吸收后一定会以呼吸作用的形式进入气室,从而与碳酸盐岩石试片反应进入碳酸盐岩.实际在回收时,发现塑料袋基本都已破裂,故本方法取消.

2.3 金佛山碳循环模型

利用 GEOAGENT 模型中的有穷自动机模型(DFA)进行金佛山碳循环模型的建立:
确定有穷自动机

$$DFA = (Q, \Sigma, t, q_0, F)$$

其中: Q 为金佛山森林碳循环非空有穷状态集, 其中的每个溶蚀试片质量作为元素称为一个状态; Σ 为金佛山森林碳循环有穷输入数据表; t 为金佛山森林碳循环单值映射状态转换函数; $q_0 \in Q$ 称之为开始状态集, 输入溶蚀试片质量数据; $F \subseteq Q$ 称之为终止状态集, 输出碳移动量; 其中 t 为:

$$y = \lim_{x \rightarrow q} \sum_{q_0}^F \prod_q \frac{f \pm \sqrt{f^2 - q_0 F}}{3f}$$

$$F = \prod_q \lim_{q \rightarrow m} q \frac{q!}{q! (m - q)!}$$

按照本模型, 输入模型计算所需的溶蚀试片质量变化矩阵后, 计算得到金佛山森林碳汇总量为 2 644 168 t.

2.4 金佛山森林可交易碳汇

在以上研究的基础上, 本研究对金佛山森林可交易碳汇进行了计算. 金佛山森林可交易碳汇计算的主要思路是用金佛山森林碳汇量减去当地 GDP 碳排放总量.

2010 年我国碳排放总量 $317\,776.11 \times 10^4$ t, GDP 为 246 619 亿元人民币, 单位 GDP 碳排放量为 0.128 kg/元, 南川地区 2010 年 GDP 为 138 亿元人民币, 按此方法折合成碳排放是 1 778 172 t. 需要说明的是, 统计年鉴中并没有列出各行业的碳排放比重, 这个值只是推算值.

从金佛山碳通塔溶蚀试片平均质量都是增加的情况可以判断, 金佛山属于碳汇. 将金佛山森林碳汇减去南川 GDP 碳排放总量为 865 996 t, 不足以抵消南川 GDP 碳排放总量.

3 结论与讨论

3.1 结 论

1) 碳酸盐岩地区岩溶作用对森林碳循环有着重大的影响, 岩溶作用可能影响当地大气二氧化碳含量, 从而影响森林的光合作用, 对森林碳循环产生影响;

2) 在金佛山地区, 大面积分布的碳酸盐形成的地质作用碳循环, 有的二氧化碳被当地森林吸收;

3) 金佛山森林碳汇减去南川 GDP 碳排放总量后所得到的碳汇量不足以抵消南川 GDP 碳排放总量, 并没有余额可供交易.

3.2 讨 论

本项目由于经费有限, 在选取研究方法时选择了成本相对较低的溶蚀试片法, 但由于金佛山岩溶土壤特殊的空间异质性(特别是土壤不连续), 使得溶蚀试片埋放的代表性(需要大量的埋片实验才能获得有统计意义的结果)成为溶蚀试片法应用的重要障碍. 在实际试验过程中很多溶蚀试片丢失; 另外, 在利用碳同位素法对试验结果进行验证时, 发现塑料袋基本都已破裂, 故该验证方法无法执行, 所以研究结果可能存在一定的误差.

参考文献:

- [1] 殷鸣放, 杨琳, 殷炜达, 等. 森林固碳领域的研究方法及其最新进展 [J]. 浙江林业科技, 2010, 30(6): 78—85.
- [2] 王冬银. 典型岩溶山区土地利用方式对岩溶作用的影响——以重庆市南川金佛山为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [3] 孙艳丽, 况明生. 夏季金佛山垂直自然带上岩溶生态系统内 CO₂ 动态的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2004.
- [4] 刘再华. 岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗—平衡化学法”——兼论水化学径流法和溶蚀试片法 [J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 379—382.
- [5] 张修玉, 许振成, 宋巍巍, 等. 森林碳循环研究方法及其存在问题分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6E): 26—32.
- [6] 吕景辉, 任天忠, 闫德仁. 国内森林碳汇研究概述 [J]. 内蒙古林业科技, 2008, 34(2): 43—47.
- [7] 查同刚, 张志强, 朱金兆, 等. 森林生态系统碳蓄积与碳循环 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 112—119.

- [8] 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 CO₂ 的汇 [J]. 中国岩溶, 2000, 19(3): 212—217.
- [9] 宋 霞, 刘允芬, 徐小锋. 箱法和涡度相关法测碳通量的比较研究 [J]. 江西科学, 2003, 21(3): 206—210.
- [10] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题 [J]. 南方国土资源, 2003(1): 22—25.
- [11] 董文福, 管东生. 森林生态系统在碳循环中的作用 [J]. 重庆环境科学, 2002, 24(6): 25—28.
- [12] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 24—28.
- [13] 周玉荣. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518—522.
- [14] 杨亚梅, 胡 蕾, 武 伟, 等. 贵州省陆地净初级生产力的季节变化研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(9): 123—128.
- [15] KATZ E, RAPPORT H. On Human Capital Formation with Exit Options [J]. Journal of Population Economics, 2005, 18(2): 267—274.
- [16] STRULIK H. Economic Growth and Stagnation with Endogenous Health and Fertility [J]. Journal of Population Economics, 2004, 17(3): 433—453.

On Forest Carbon Cycle on the Basis of Corrosion Specimen Method Geoagent Model Method

ZHA Rui-sheng, KUANG Hong-hai

School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Forest carbon cycle plays an important role in the global carbon cycle, and catches great attention of scholars in the Global Change research at home and abroad. After comprising Corrosion Specimen Method, Carbon Isotope Method and GEOAGENT Model Method, the author has selected Corrosion Specimen Method as the main research method. The project has started with nutrient cycle of forest ecosystem, by means of *Neolitsea aurata*, Beech and *Oiltea camellia* to research the forest ecosystem carbon flux in Jinfo Mountain, adopting Carbon Isotope Method as the main verified means, trying to establish the forest ecosystem carbon cycle model based on GEOAGENT. On the basis of calculating the forest carbon sinks in Jinfo Mountain, Offseted Nanchuan GDP carbon emissions and geological carbon emissions, speculated that the possibility to trade carbon sinks is little for Nanchuan.

Key words: forest carbon cycle; Corrosion Specimen Method; Jinfo Mountain

责任编辑 胡 杨