

# 岩溶地区石漠化综合治理的固碳增汇效应研究 ——基于实地监测数据的分析

陈伟杰,熊康宁,任晓冬,周文龙

(贵州师范大学中国南方喀斯特研究院,贵州 贵阳 550001)

**摘要:**为了探索岩溶地区石漠化综合治理的碳汇效应,以贵州毕节石桥小流域、清镇王家寨—羊昌洞小流域、贞丰顶坛小流域为研究对象,通过分析实地监测数据,分别测算了各研究区总碳存量,分析并比较了碳储量在各碳库以及不同等级石漠化之间的分布情况和大小关系。研究发现:三个研究区总碳存量仅为32 434.9tC;各碳库碳存量:土壤层>植被层(草本层>灌木层);碳密度在不同等级石漠化间关系表现为:轻度>中度>强度;总碳密度在各研究区中的大小关系表现为:毕节>清镇>贞丰,其中土壤层碳密度起决定性因素。此外,本文最后还提出在未来石漠化综合治理中增加碳汇监测指标、扩大石漠化综合治理碳汇研究的范围、加强岩溶作用碳汇效应基础研究等建议。

**关键词:**石漠化治理;碳汇;碳循环;环境变化;贵州

**中图分类号:**X171.4;Q945.11

**文献标识码:**A

## 0 引言

中国以贵州高原为中心的南方岩溶地区是世界上面积最大、最集中连片的岩溶区,面积超过55万km<sup>2</sup>,也是热带、亚热带岩溶发育最典型、最复杂、景观类型最丰富的一个片区。由于裸露型、半裸露型岩溶广泛分布,特殊的生态环境对自然、经济和社会发展都产生了多方面的效应:人口超载,毁林开荒,水土流失与石漠化加剧,可利用耕地不断减少,经济社会发展滞后,生态环境迫切需要治理。

根据国家《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》,到2015年,完成石漠化治理面积约7万km<sup>2</sup>,新增林草植被面积9.42万km<sup>2</sup>,植被覆盖率提高8.9个百分点。贵州作为全国岩溶面积最大、岩溶

地貌最为典型(在《大纲》中划分的8大岩溶区石漠化综合治理区域中,有5大类型区能在贵州找到典型示范点)的省份,有78个县(市、区)被列为治理的规划区,到2015年,完成石漠化专项综合治理面积约2.03万km<sup>2</sup>,新增林草植被近1.77万km<sup>2</sup>,植被覆盖率从34.9%增加到50%。

目前,开展的大规模石漠化治理工程的碳汇作用机理是怎样的?对固碳增汇有多少贡献?未来固碳潜力有多少?等等问题需要开展研究。根据贵州岩溶的发育特征和生态环境的差异,以典型小流域为基本研究单元,选取在岩溶发育和生态环境结构上具有典型代表性的毕节石桥小流域、清镇王家寨—羊昌洞小流域、贞丰顶坛小流域作为研究对象,通过对实地监测数据进行多维度分析,揭示目前岩溶石漠化治理区的

基金项目:国家十一五科技支撑计划重大课题“喀斯特高原退化生态系统综合整治技术与模式”(2006BAC01A09)、贵州省科技计划课题“贵州喀斯特石漠化生态系统综合整治技术与模式的研究与示范”(黔科合S字[2007]1060)、贵州省科技计划课题“喀斯特地区石漠化综合治理碳汇计量模型的研发与示范”(黔科合SY字[2010])联合资助

第一作者简介:陈伟杰(1985—),男,自然地理学硕士研究生,研究方向:自然资源开发与区域规划。E-mail: cwjljz@126.com。

通讯作者:熊康宁(1958—),男,教授、博士生导师,研究方向:喀斯特地貌与洞穴,喀斯特生态环境保护与石漠化治理。E-mail: xiongkn@163.com。

收稿日期:2010-06-12

碳汇效应以及碳储量在岩溶生态系统内的分布规律，并提出下一步的研究展望。

1 研究区概况

研究区由毕节石桥、清镇王家寨—羊昌河及贞丰顶坛3个小流域组成(图1)。

1.1 毕节石桥小流域

石桥小流域是毕节鸭池石漠化综合治理示范区

的核心区，位于贵州毕节市东南面的鸭池镇境内，地处乌江流域上游，属岩溶高原山地地貌类型，地势起伏大，海拔1 400~1 700m；总面积8.54km<sup>2</sup>，轻度、中度、强度石漠化面积分别为2.82km<sup>2</sup>、0.92km<sup>2</sup>和0.41km<sup>2</sup>；属亚热带湿润季风气候区，流域内年均气温14.03℃，年均降雨量863mm，降雨量主要分布在7—9月，植被多为亚热带常绿阔叶林，原生植被多被破坏，多为次生林。该区属温凉春干夏湿岩溶高原山地生态环境。

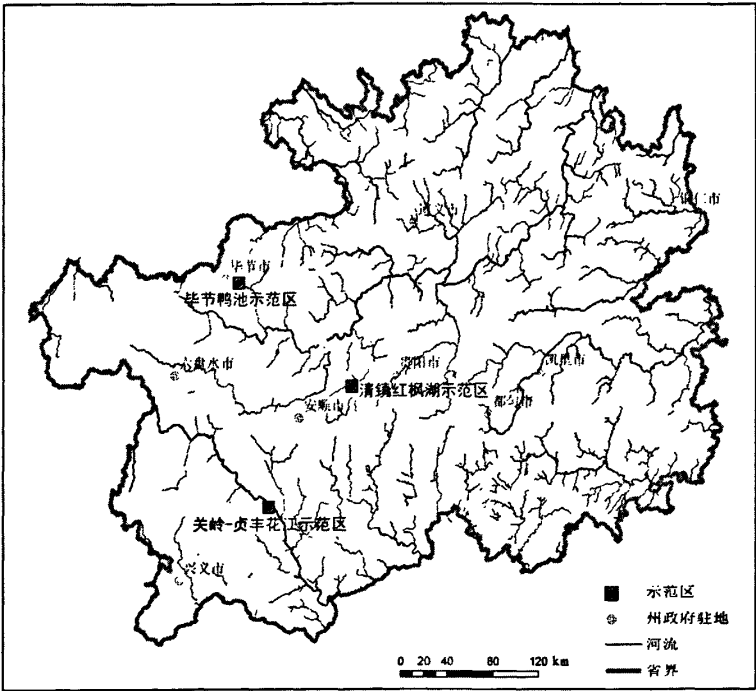


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study areas

1.2 清镇王家寨—羊昌洞小流域

清镇王家寨—羊昌洞小流域是清镇红枫湖示范区的核心区，位于清镇市西南部，属岩溶高原盆地地貌类型，区内中部洼地面积所占的比例较大，周围的山地、峰丛的地形破碎，山高坡陡，岩溶作用强烈。面积4.05km<sup>2</sup>，石漠化面积占总面积的13.1%；属热带湿润季风气候区；气候温和，雨量充沛，热量充足，雨热同季，年均气温14℃，年降雨量1 200mm。区内人口密度大，流域受人类活动的干预强烈，土地垦殖率高，峰丛坡地的植被破坏严重，土壤侵蚀较严重。该区代表了温和春半干夏湿岩溶高原盆地生态环境。

1.3 贞丰顶坛小流域

贞丰顶坛小流域是关岭—贞丰花江示范区的核心区，位于贵州西南部北盘江花江河段峡谷的两岸，北盘江由西北向东南流经样区，属岩溶高原峡谷地貌类型，地势起伏大，海拔450~1 450m，相对高差1 000m，总面积16.41km<sup>2</sup>，轻度、中度、强度石漠化面积分别为4.64km<sup>2</sup>、1.41km<sup>2</sup>和1.21km<sup>2</sup>；属亚热带湿润季风气候区，海拔850m以下为南亚热带干热河谷气候，区内年平均气温18.4℃，年均降水量1 100mm。区内岩溶地貌极为发育，地形破碎，基岩裸露率高，水土流失严重，石漠化强度发育，生态环境十分脆弱，该区代表了高原干热河谷生态环境。

## 2 材料及方法

我们将石漠化综合治理固碳增汇效应研究的重点放在植被、土壤两大碳库上。材料来自课题组对研究区实地监测数据。在小斑勾绘和实地调查基础上,以不同石漠化等级为主要依据,分别选取一定数量的典型样地,按不同的时间周期分别进行植被生物量、土壤有机质、土壤容重的测定。样品的具体测定方法如下:

### 2.1 测量方法

#### 2.1.1 植被层分为灌木层和草本层,采用不同的生物量测定方法

草本层生物量以全割法(每个样地设置2个1 m × 1 m 样方)实测,取样带回实验室烘干(60℃, 48h)后用天平称重,精确到0.1g。再运用以下公式计算<sup>[1]</sup>:

$$W_{\#} = M/S \quad (1)$$

式中: $W_{\#}$ 为草本生物量(g/m<sup>2</sup>); $M$ 为草本干重(g); $S$ 为采样地面积(m<sup>2</sup>)。

灌木层生物量主要根据各样地中不同作物的平均地径和平均高度而定。运用公式计算<sup>[2]</sup>:

$$W_{\#} = 0.495(D^2H)^{0.07402} \quad (2)$$

式中: $W_{\#}$ 为地上部分生物量(g/m<sup>2</sup>); $D$ 为作物平均地径(m); $H$ 为作物平均高度(m)。

#### 2.1.2 土壤容重、土壤有机质的测定

在每个样地内进行土壤样品的采集,取样深度为0~20cm,用环刀浸水法测定土壤容重,用国际GB 7857—87的重铬酸钾-外加热法测定土样有机质。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 植被层碳密度的计算方法

虽然灌木层和草本层生物量的测定方法不同,但碳密度的计算公式却相同<sup>[3]</sup>:

$$C_{\#} = W \cdot a \cdot (1 - \partial) \quad (3)$$

式中: $C_{\#}$ 为植被碳密度(gC/m<sup>2</sup>); $W$ 为植被生物量(g/m<sup>2</sup>); $a$ 为生物量中的平均含碳率,在我国一般木本植被含碳率可取0.5,草本植被或农作物可取0.43<sup>[4,5]</sup>; $\partial$ 为研究区岩石裸露率(%)。

由于在测量灌木层生物量的时候,求出的 $W_{\#}$ 是地上部分的生物量,缺乏地下部分生物量的数据。马钦彦、陈遐林<sup>[5]</sup>等人对华北主要森林类型建群种各组分的含碳率研究,发现灌木丛地上部分平均含碳率与地下部分(根系)含碳率之比为1:0.992,因此本文中

灌木层碳密度的计算公式可演化为:

$$C_{\#} = 1.992W_{\#} \cdot a \cdot (1 - \partial) \quad (4)$$

由于草本层生物量采用全割法实测,因而在计量土壤碳密度( $C_{\#}$ )时直接选用公式(3), $a$ 取值为0.43。

#### 2.2.2 土壤碳密度的计算方法

土壤碳密度按以下公式计算<sup>[6,7]</sup>:

$$C_{\pm} = \sum_{i=1}^n D_i \cdot d_i \cdot O_i \cdot \delta \cdot (1 - \partial) / 100 \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (5)$$

式中: $C_{\pm}$ 为土壤碳密度(kgC/m<sup>2</sup>); $D_i$ 为第*i*层土层厚度(cm); $d_i$ 为第*i*层土壤容积密度(g/cm<sup>3</sup>); $O_i$ 为第*i*层土壤有机碳含量(g/kg); $\delta$ 为粒径<2mm的砾石含量(%); $i$ 为土壤发生层次,一般为3~5层。

在岩溶环境下,成土速度极慢,特别在石漠化严重地区,土壤流失严重,裸露型和浅覆盖型岩溶分布广泛,土层厚度一般在40cm左右<sup>[8]</sup>。而且大量的研究显示,土层越深,土壤有机碳含量越低,一般1m深的土壤剖层中50%以上的土壤有机碳富集在0~40cm的浅层土壤里<sup>[9,10]</sup>,本文只取1层0~20cm的表层土壤, $i$ 为1。鉴于各研究区内土壤质地多为粘粒和粉粒(二者之和均在80%以上),粒径大于2mm的砾石含量不高,因此取 $\delta$ 值为80%。公式(5)可简化为公式(6):

$$C_{\pm} = 0.8D \cdot d \cdot O \cdot (1 - \partial) / 100 \quad (6)$$

#### 2.2.3 石漠化综合治理的固碳总量计算方法

在不同等级石漠化斑块上选取能反映不同等级石漠化特征的典型样地,计算得出各等级石漠化上的平均植被、土壤碳密度,因而在计算总固碳量时,以各石漠化等级面积为权重,运用以下公式计算:

$$C_{\Sigma} = \sum_{j=1}^3 K_j (C_{j\#} + C_{j\#} + C_{j\pm}) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中: $C_{\Sigma}$ 为研究区石漠化综合治理的固碳总量,单位为t; $K_j$ 为*j*级石漠化面积,单位为m<sup>2</sup>;  $j$ 为石漠化等级,按照熊康宁等人(2002)的分级标准分为5级:无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化<sup>[11]</sup>。由于石漠化综合治理工程原则上只针对轻度以上等级石漠化,本文旨在测算石漠化治理工程的碳汇作用,因此这里只选取轻度、中度、强度作为计量范围。 $C_{j\#}$ 、 $C_{j\#}$ 和 $C_{j\pm}$ 分别为*j*级石漠化上的草本层、灌木层和土壤碳储量。具体数据分析在EXCEL2007中进行,计算结果见表1。

表 1 不同等级石漠化中各碳库碳存量统计表

Tab. 1 Statistic table of carbon storage in the carbon pools under different rock desertification grade

| 研究区          | 石漠化等级 | 面积/km <sup>2</sup> | 灌木层碳储量/kgC |             |             | 草本层碳储量/kgC |             | 土壤层碳储量/kgC    |               |               |
|--------------|-------|--------------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
|              |       |                    | 2006 年 8 月 | 2006 年 12 月 | 2009 年 12 月 | 2006 年 8 月 | 2006 年 12 月 | 2006 年 12 月   | 2008 年 8 月    | 2009 年 4 月    |
| 贞丰           | 强度    | 1.21               | 24.52      | 23.90       | 16.68       | 3 981.73   | 4 045.84    | 844 022.83    | 779 002.30    | 863 009.52    |
|              | 中度    | 1.41               | 53.07      | 51.35       | 36.09       | 9 807.67   | 9 860.54    | 1 595 194.88  | 1 710 077.46  | 2 018 050.95  |
|              | 轻度    | 4.64               | 210.51     | 220.49      | 153.59      | 44 377.22  | 44 520.91   | 9 761 323.95  | 7 576 768.68  | 8 733 845.03  |
|              | 汇总    | 7.26               | 288.09     | 295.75      | 206.36      | 58 166.63  | 58 427.29   | 12 200 541.66 | 10 065 848.43 | 11 614 905.50 |
| 毕节           | 强度    | 0.41               | 41.14      | 41.14       | —           | 7 356.29   | 7 494.29    | 1 808 697.53  | 1 762 797.38  | 2 072 988.94  |
|              | 中度    | 0.92               | 105.83     | 105.83      | 64.88       | 17 875.28  | 18 018.89   | 2 821 009.52  | 3 058 132.51  | 3 837 820.59  |
|              | 轻度    | 2.82               | 393.22     | 421.31      | —           | 79 073.65  | 77 751.91   | 6 377 947.81  | 7 208 155.55  | 7 661 335.54  |
|              | 汇总    | 4.15               | 540.20     | 568.29      | 64.88       | 104 305.22 | 103 265.09  | 11 007 654.85 | 12 029 085.43 | 13 572 145.06 |
| 清镇王家寨—羊昌洞小流域 | 强度    | 0.42               | 10.96      | 10.96       | 7.52        | 1 773.59   | 1 800.90    | 522 553.51    | 517 576.15    | 652 973.35    |
|              | 中度    | 1.18               | 44.73      | 44.73       | 28.32       | 9 630.89   | 9 965.15    | 2 148 032.20  | 2 034 371.08  | 2 630 196.39  |
|              | 轻度    | 2.75               | 184.32     | 197.48      | 100.45      | 29 612.82  | 31 443.02   | 6 350 054.76  | 6 140 176.10  | 8 351 842.20  |
|              | 汇总    | 4.35               | 240.01     | 253.17      | 136.29      | 41 017.31  | 43 209.06   | 9 020 640.47  | 8 692 123.33  | 11 635 011.95 |

注:①不同等级石漠化面积数据分别取贞丰、毕节和清镇《岩溶地区石漠化综合治理试点实施方案(2008~2010)》。  
②2009 年 12 月草本层碳储量数据缺失。

3 结果与分析

3.1 各碳库总碳存量比较分析

从总碳储量的构成来看,三个研究区总碳储量的构成中,土壤层碳储量远远大于植被层碳储量。2006 年 12 月(该时段各碳库数据连续,具备可加性和可比性)三个示范区轻度以上石漠化面积达 15.76km<sup>2</sup>,总碳储量为 3.24×10<sup>7</sup>kgC,其中土壤层碳储量为 3.22×10<sup>7</sup>kgC,占总碳储量的 99.36%;植被层碳储量为 2.06×10<sup>5</sup>kgC,仅占总碳储量的 0.64%;在植被层中又以草本层碳储量远远大于灌木层碳储量,草本层碳储量占植被层碳储量的 99.46%,而灌木层碳储量仅占 0.54%(图 2)。各碳库碳储量的这种关系在三个研究区内以及不同年份内均能得到体现。故可以推断出石漠化综合治理区内各碳库碳存量的相对关系:土壤层>植被层(草本层>灌木层)。

大量的研究发现,在生态系统中,土壤层是最大的碳库,大约占陆地生态系统有机碳储量的 2/3<sup>[12]</sup>,土壤碳库>植被层碳库的关系普遍存在于各类生态系统中(表 2)。

从表 2 看出,除极个别研究得出植被层碳密度比土壤层碳密度大之外,如李意德、方精云(1998)对中国海南尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的研究,世界范围内不同学者对各类森林生态系统中土壤碳储量或碳密度普遍大于植被碳储量或碳密度的看法

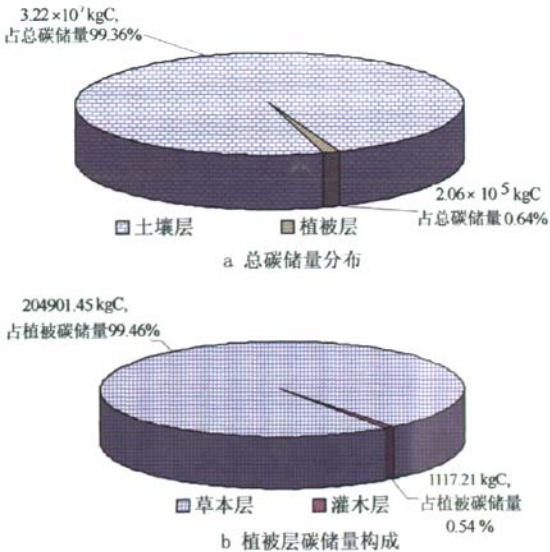


图 2 2006 年 12 月示范区各碳库平均碳存量比例图

Fig. 2 Pie chart of average carbon storage in different carbon pools in December, 2006

趋于一致,土壤储存的碳约为植被中的 1~5 倍。相比起其它生态系统,贵州岩溶石漠化地区二者之间的比例关系显得特别的失衡,根据 2006 年的检测资料显示,土壤层碳储量系植被层的 156 倍。植被层碳储量比例之小及其绝对数量之少可以看出,石漠化地区是一个植被严重退化的生态系统。

表2 各类生态系统植被与土壤碳储量

Tab. 2 Carbon storage in vegetation and soil in different types of ecosystem

| 研究者                                      | 植被碳储量                    | 土壤碳储量                          | 后者为前者的倍数 | 研究地区           |
|------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------|----------------|
| Wood well (1978) <sup>[12]</sup>         | 744×10 <sup>15</sup> g   | (925~2 775)×10 <sup>15</sup> g | 1.2~3.7  | 全球范围内的森林       |
| Post (1990) <sup>[14]</sup>              | 574×10 <sup>15</sup> g   | 1 300×10 <sup>15</sup> g       | 2.3      | 全球范围内的森林       |
| Prentice and Fung (1990) <sup>[15]</sup> | 748×10 <sup>15</sup> g   | 1 143×10 <sup>15</sup> g       | 1.5      | 全球范围内的森林       |
| Adams J. M. et al (1990) <sup>[16]</sup> | 924×10 <sup>15</sup> g   | 1 395×10 <sup>15</sup> g       | 1.5      | 全球范围内的森林       |
| 田中正之(1992) <sup>[17]</sup>               | 600×10 <sup>15</sup> g   | 1 490×10 <sup>15</sup> g       | 2.5      | 全球范围内的森林       |
| Sundquist (1993) <sup>[18]</sup>         | 560×10 <sup>15</sup> g   | 1 600×10 <sup>15</sup> g       | 2.9      | 全球范围内的森林       |
| Robert K. Dixon (1995) <sup>[19]</sup>   | 88×10 <sup>15</sup> g    | 471×10 <sup>15</sup> g         | 5.3      | 高纬地区 (60°~90°) |
| Robert K. Dixon (1995) <sup>[19]</sup>   | 59×10 <sup>15</sup> g    | 100×10 <sup>15</sup> g         | 1.7      | 中纬地区 (30°~60°) |
| Robert K. Dixon (1995) <sup>[19]</sup>   | 212×10 <sup>15</sup> g   | 216×10 <sup>15</sup> g         | 1        | 低纬地区 (0°~30°)  |
| Foley (1995) <sup>[20]</sup>             | 800.2×10 <sup>15</sup> g | 1 373.2×10 <sup>15</sup> g     | 1.7      | 全球范围内的森林       |
| King (1995) <sup>[21]</sup>              | 778.4×10 <sup>15</sup> g | 1 537.9×10 <sup>15</sup> g     | 2        | 全球范围内的森林       |
| 李克让 (2003) <sup>[22]</sup>               | 13.33Gt                  | 82.65 Gt                       | 6.2      | 中国陆地生态系统       |
| 本研究(2006)                                | 206 018.65 kg            | 32 228 836.98 kg               | 156      | 贵州岩溶石漠化地区      |

从碳密度来看,三个研究区轻度等级以上石漠化地区的植被层平均碳密度为0.013kgC/m<sup>2</sup>,其中草本层平均碳密度为0.012 kgC/m<sup>2</sup>,而灌木层的碳密度更小,只有0.000 1kgC/m<sup>2</sup>。相对来说,土壤层的碳密度大得多,约为2.04kgC/m<sup>2</sup>,但从全国的角度来看其碳密度仍然低于全国平均水平,甚至比其它生态脆弱地区土壤碳密度要低(见表3)。

表3 中国各类生态系统植被和土壤平均碳密度

Tab. 3 Carbon average density in vegetation and soil in different types of ecosystem in China

| 地 区                       | 平均碳密度/kgC/m <sup>2</sup> |               |
|---------------------------|--------------------------|---------------|
|                           | 植被                       | 土壤            |
| 全国陆地生态系统 <sup>[22]</sup>  | 1.47                     | 9.17          |
| 全国森林生态系统 <sup>[23]</sup>  | 5.70                     | 719.4         |
| 黄土高原 <sup>[24]</sup>      | —                        | 1~4(0~20cm)   |
| 中国海南热带林 <sup>[25]</sup>   | 23.431                   | 10.767        |
| 华北落叶松人工林 <sup>[26]</sup>  | 2.75                     | 815.714       |
| 黄河上游退耕地人工林 <sup>[3]</sup> | 1.3                      | 216.49        |
| 茂兰岩溶森林 <sup>[27]</sup>    | 16.82                    | —             |
| 滇黔桂地区 <sup>[10]</sup>     | —                        | 4.33(0~20cm)  |
| 贵州岩溶石漠化地区                 | 0.013                    | 2.04 (0~20cm) |

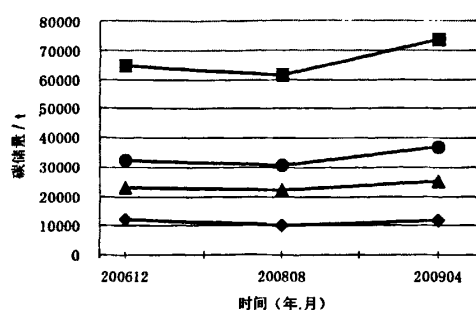
笔者在实地调查时发现,该三个研究区是石漠化非常严重的区域,地表裸露高,植被生长稀疏,且以次生低矮的灌木、草本植物为主,生物量少。虽然从2005年开始实施石漠化综合治理,但短期内严重退化的石

漠化生态系统不能马上恢复<sup>[8]</sup>。2009年周文龙曾对该研究区石漠化治理工程对生态系统的影响进行研究,发现,在短期内,石漠化治理工程对水土流失的影响最大,其中又以坡改梯工程治理效果最为理想,而生物治理工程与恶劣的生态环境对抗时表现出一种进退反复、以进为主的渐进过程。

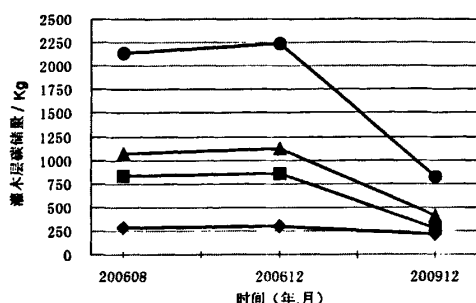
综上所述,三个研究区内轻度等级以上石漠化地区的碳汇效应不明显,碳库碳存量土壤层>植被层(草本层>灌木层),相比其他生态系统,研究区内各碳库之间比例特别失衡,土壤碳密度稍大,但仍大大低于全国平均量。从另一个角度看,石漠化地区土壤碳汇潜力巨大。而从更长的时间维度和更广的测算边界来看,石漠化综合治理固碳增汇效应会更明显。根据石漠化综合治理的设计规划,预计在50年内,石漠化综合治理的效应才会完全的体现出来。如果按照50年计算,期间的固碳效应的累积量也应该会很大。而且,石漠化综合治理的其它工程,例如农田整理,水土保持工程、庭院经济建设中的沼气工程等的固碳增汇效应还没有比较科学的评估方法,因为还不能确定这些工程的固碳增汇效应的贡献量。

3.2 石漠化综合治理示范区碳存量年际变化情况

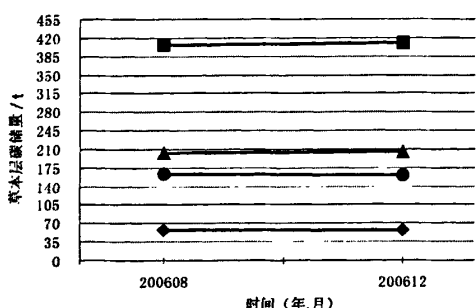
由于各碳库监测数据缺乏连续性和统一性,难以从整个系统碳储量的角度比较其年际变动情况,故本文对土壤层、植被层(灌木层,草本层)碳储量的年际变动情况分别进行对比(图3),进而推测整个系统碳储量的历史变化趋势。



a 土壤层碳储量缓慢增长



b 灌木层碳储量年际变动曲线



c 草本层碳储量年际变动曲线

图3 各碳库碳储量年际变动曲线图

Fig. 3 Annual curve of carbon storage in different carbon pools

对于植被层中的灌木层来说,在三个监测时间段里,其总碳储量经历了缓慢上升然后急剧下降(降幅达 50.4%)的过程,而草本层碳储量在监测时间段里也表现出缓慢上升的过程(见图3b,c)。尽管对于草本层来说缺乏 2009 年 12 月份的监测资料,但根据灌木层碳储量变动曲线可以推断草本层在该时段内碳储

量同样出现了急剧下降过程。对于研究区内的植被来说,人为干扰和气候变化是影响其碳储量的主要因素。结合实际情况分析发现,2009 年入秋(9 月 1 日)以来,贵州省乃至大西南各地旱情持续发展,出现历史罕见的旱灾,贵州全省大部地区秋冬旱的天数达 80 天以上,其中西部、南部、北部部分地区达 100 天以上。2009 年 10 月 1 日至 2010 年 1 月 1 日,各示范区降雨量为 0,突破历史最低值(图 4)。异常的气候灾害对脆弱的岩溶生态恢复地区植被生长影响极为强烈,植被层枯萎严重,在样地里基本监测不到生物量,如能监测也只是几毫克每平方米。

从图 3a 可以发现,土壤层碳储量在三个监测时间里,无论是从总碳储量曲线来看还是分别从各示范区土壤碳储量曲线看,它们都经历了先降后升的过程。对照降雨量变化曲线图发现,从 2008 年 7 月到 2009 年 2 月,示范区降雨量一直呈下降走势,而 2009 年 2 月至 4 月,降雨量一直呈上升走势,降雨量的变动情况与该时段内土壤层碳储量变动情况一致。一般认为土壤碳密度随着降水增加而增加<sup>[28]</sup>,因此可以推断,土壤碳储量在 2009 年 12 月份同样呈下降趋势。

由于监测时间不长,而且监测数据连续性较差,不能对研究区较长时间段内的碳储量进行更精确的预测,但石漠化综合治理示范区属于脆弱生态系统,系统敏感性强,碳存量在正常年份会呈上升的趋势,但易受气候灾害的影响而出现较大的变化。

### 3.3 不同等级石漠化碳密度变化情况

不同等级石漠化的植被覆盖度是不同的,一般来说,石漠化级别越高,裸露率也大,植被覆盖度越少,植被越稀疏,生物量也少,因此植被碳密度也越少。对各碳库不同等级石漠化地区碳密度进行对比分析,发现植被层碳密度与石漠化等级呈现明显的相关性,普遍随着石漠化等级升高,碳密度逐渐降低。就植被层碳库来看,各研究区内,轻度石漠化的碳密度均占总碳密度(轻度+中度+强度)较大比例,其中以贞丰顶坛小流域占的比例最大,轻度石漠化碳密度占总碳密度的 48.2%,其次是清镇王家寨—羊昌洞小流域,占 46.9%,最小的毕节石桥小流域也占 42.5%。可见,各研究区植被层碳密度存在明显的分布规律,即:轻度>中度>强度(图 5a,b)。这一方面是由于植被覆盖率本身是划分不同等级的石漠化的重要指标,另一方面植被层碳密度与其土地利用分布规律相关,不同等级石漠化碳密度与其土地利用分布规律相关。一般情况下,轻度石漠化生境较好,水土保持较好;中度石漠化

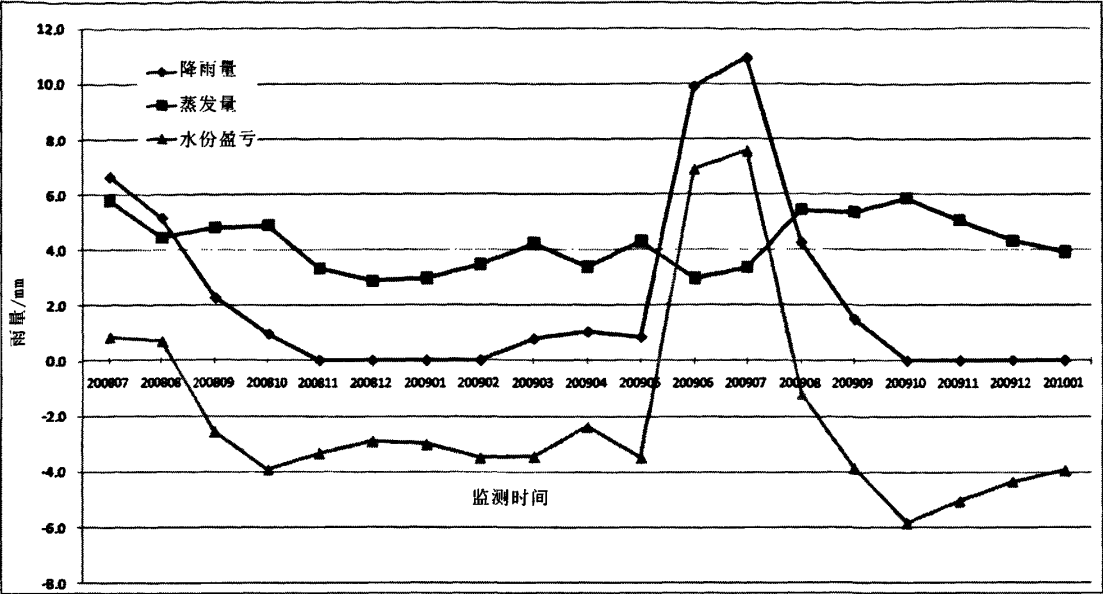


图4 研究区2008—2010年月均降雨量、蒸发量变动曲线图

Fig. 4 Curve of monthly average rainfall and evaporation in the study catchments from 2008 to 2010

注:数据来自研究区历年小气候连续监测资料。

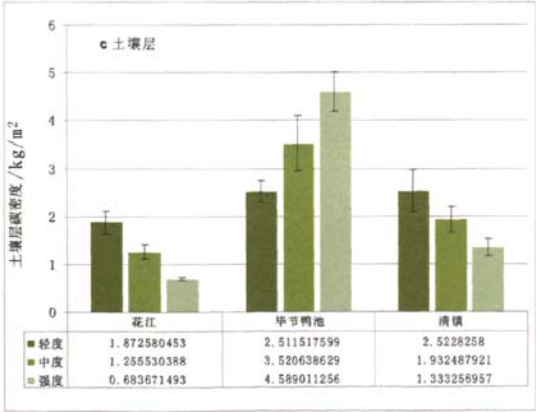
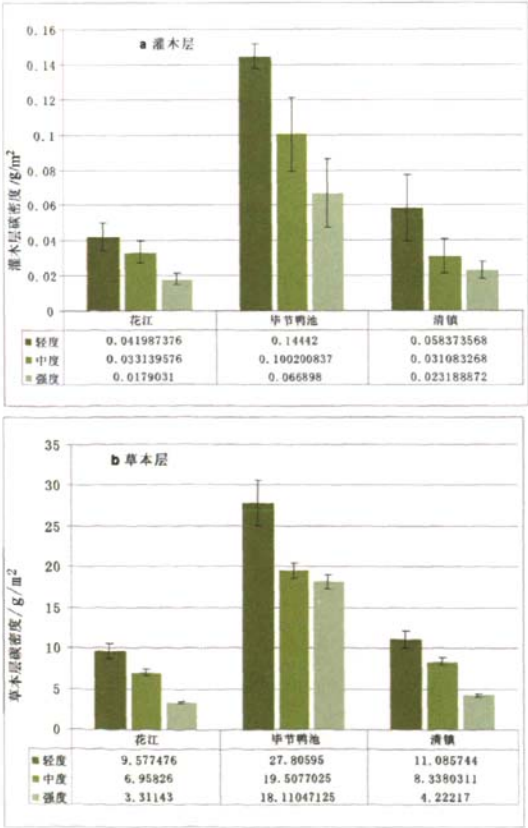


图5 各碳库不同等级石漠化碳密度变化柱状图

Fig. 5 Histogram of carbon storage change under different desertification grade

次之,水土流失加剧;强度石漠化岩石裸露,水土流失严重。在三个研究区中,以清镇红枫湖示范区不同等级石漠化土地利用分布规律较为典型(图6),该示范区轻度石漠化面积2.75km<sup>2</sup>,主要分布在其它林地和天然草地两种土地利用类型上,分别占轻度石漠化面积的70.37%和21.99%;而中度石漠化面积1.18km<sup>2</sup>,主要分布在陡坡耕地、其它草地和其它林地三种土地利用类型中,分别占其面积的39.46%、

39.04%和13.94%;强度石漠化面积0.42km<sup>2</sup>,全部分布在裸岩石砾地上<sup>[29]</sup>。

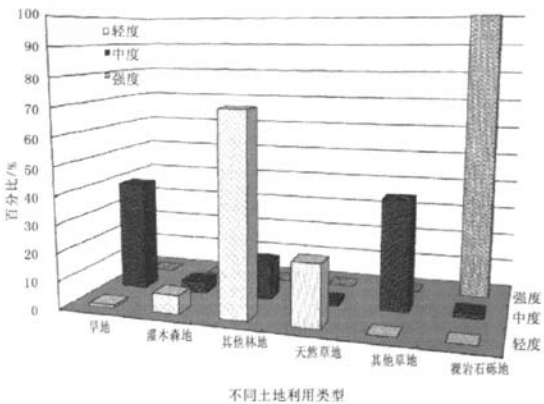


图6 红枫湖示范区轻、中、强度石漠化土地利用分布图  
Fig. 6 The land use distribution structure of different rock desertification in Hongfeng Lake demonstration area

但土壤层碳密度在石漠化等级中的分布规律并不明显(图5c),贞丰顶坛小流域和清镇王家寨—羊昌洞小流域不同石漠化等级的土壤碳密度大小依序为

轻度>中度>强度,但毕节石桥小流域却是强度>中度>轻度。一般认为,影响土壤碳密度分布的因素更复杂多样,除了土地利用方式外(地表覆盖物),降雨量、地表温度、成土母质、土壤质地和pH值均对土壤碳密度有显著的影响<sup>[28]</sup>。

综上所述,研究区内植被碳密度的分布与石漠化等级呈现很强的相关性,随着石漠化等级升高,植被碳密度逐渐降低,而且各研究区轻度石漠化中的碳密度含量均占植被层总碳密度的40%以上。而影响土壤碳密度分布的因素更复杂,在本研究中尚不能发现土壤碳密度在不同等级石漠化中的普遍分布规律。

3.4 不同示范区碳密度对比分析

由于计算总碳存量时,以研究区内不同等级石漠化面积为权重来计算,因此要比较不同研究区的固碳效应时应以碳密度为宜。通过2006年12月各研究区总碳密度(表4)可以看出,由于土壤碳库的碳密度比植被层碳密度大得多,因此在比较各研究区总碳密度时,土壤碳密度具有决定性的影响(占总碳密度的99%左右),三个研究区中毕节石桥小流域的总碳密度最大,为9.81 kgC/m<sup>2</sup>。

表4 各示范区各碳库总碳密度统计表(单位:kgC/m<sup>2</sup>)

Tab. 4 Statistics of carbon density in each carbon pool in the study areas (Unit: kgC/m<sup>2</sup>)

| 示范区       | 灌木层碳密度                | 草本层碳密度                 | 土壤碳密度    |         |         |
|-----------|-----------------------|------------------------|----------|---------|---------|
|           | 2006年12月              | 2006年12月               | 2006年12月 | 2008年8月 | 2009年4月 |
| 贞丰顶坛小流域   | 0.10×10 <sup>-3</sup> | 19.91×10 <sup>-3</sup> | 3.93     | 3.49    | 4.02    |
| 毕节石桥小流域   | 0.36×10 <sup>-3</sup> | 65.44×10 <sup>-3</sup> | 9.74     | 10.18   | 11.94   |
| 清镇王家寨—羊昌洞 | 0.14×10 <sup>-3</sup> | 24.15×10 <sup>-3</sup> | 5.37     | 5.18    | 6.81    |

注:此表中的碳密度为各碳库轻度石漠化以上的总碳密度。

土壤碳密度对总碳密度具有决定性的影响,因此通过土壤碳密度历年的数据也可推断各示范区总碳密度的大小情况,由表4土壤碳密度一栏可以看出,2006年12月、2008年8月和2009年4月土壤碳密度均是毕节石桥小流域>清镇王家寨—羊昌洞小流域>贞丰顶坛小流域,因此也可以推断,在这几年中,各研究区总碳密度也应该是毕节石桥小流域最大,清镇王家寨—羊昌洞小流域次之,贞丰顶坛小流域最小。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)现阶段,石漠化综合治理的生态效应还没完全体现出来,固碳量偏低,碳汇效应不明显。2006年12月三个研究区轻度以上石漠化面积达15.76km<sup>2</sup>,

总碳储量仅为32 434 855.63 kgC,其中各碳库碳存量之间的比较关系表现为:土壤层>>植被层(草本层>>灌木层),土壤层碳存量在总碳存量中占绝对比例。对比其它生态系统,在石漠化综合治理示范区的核心小流域内,无论是植被层碳密度还是土壤层碳密度都远远低于其它生态系统。

(2)除特殊年份外(2009年的旱灾),各碳库碳存量表现出逐年缓慢增长的趋势。尽管在短期内,石漠化生态系统内的碳汇效应不明显,但从更长的生态效应显现期(按50年的石漠化综合治理规划期计算)看,石漠化综合治理区将具有很大碳汇潜力。

(3)石漠化综合治理示范区的核心小流域内,轻度等级以下石漠化地区植被层的碳汇效应最为明显,在各示范区内,轻度等级石漠化中植被层的碳密度占总碳密度的比例均在40%以上,碳密度在不同等级石

漠化之间分布关系表现为:轻度>中度>强度。在不同的示范区和不同的碳库内,这种碳密度的分布关系均表现出很强的一致性。

(4)各示范区中,总碳密度最大的是毕节石桥小流域,清镇王家寨-羊昌洞小流域次之,贞丰顶坛小流域最小,其中起决定因素的是土壤层碳密度。

#### 4.2 展望

(1)将固碳增汇效益明确列入“十二五”石漠化综合治理规划生态效应评价指标行列。在《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》中,已经明确指出石漠化综合治理具有固碳释氧的生态效益,但到目前为止,石漠化综合治理的生态效益评价中却缺少相关的指标,实际开展的生态监测中还没有专门的碳汇监测计划,目前石漠化综合治理的碳汇效应理论研究薄弱,碳汇监测工作滞后,与当前国内外探索有效碳减排途径的迫切需求不适应。因此,碳汇研究应该列入石漠化综合治理规划当中,在拓展岩溶研究理论的同时拓宽石漠化治理的生态服务领域。

(2)加强岩溶石漠化综合治理地区碳汇效应的基础理论研究。石漠化综合治理是一套调整人-地关系的系统治理工程,因此石漠化综合治理地区固碳减排效应应该是多方面的,具体来说,岩溶石漠化综合治理地区的碳汇作用主要包括:岩溶作用捕获二氧化碳;植被恢复回收二氧化碳;土壤二氧化碳含量的增加;社区替代能源使用的减排效应。

①据有关资料显示,现代岩溶作用对大气中的二氧化碳具有显著的捕获回收效应<sup>[30~33]</sup>。碳酸盐岩溶蚀过程的化学机制是 $\text{CO}_2$ 、水和岩石间的化学反应,这里形成碳酸的 $\text{CO}_2$ 主要来源于土壤层。岩溶地区石漠化综合治理工程通过恢复植被,改善土地利用方式,增加土壤层 $\text{CO}_2$ 含量,则岩溶作用加强,其碳汇作用也增强。袁道先院士指出,自2007年国家启动岩溶区石漠化综合治理工程以来,范围覆盖南方100万 $\text{km}^2$ ,经过综合治理后的岩溶地区将为全球二氧化碳减排做出重要贡献。目前需要加紧对岩溶作用碳汇对大气 $\text{CO}_2$ 捕获与回收的监测与计算方法的研究<sup>[34]</sup>。

②在石漠化地区监测植被碳存量比起其它森林地区更困难,因为石漠化地区地表破碎,空间异质性非常大,所得的资料不能兼顾到空间异质性的要求。本文中多采用均质化处理,在计算总碳存量的时候,采用不同等级石漠化面积作为权重,而现实中,同一等级石漠化的碳密度可能也有很大的差异。在未来的监测中,可结合多种技术手段,例如利用遥感或微气候手段,完善生物量计量模型,增强测量的准确性。

③在石漠化综合治理示范区内,周边社区开展大

规模的替代能源工程,包括节柴灶、沼气池等。而这部分的减排量应该纳入到整个石漠化综合治理示范区固碳减排效应的计算范围内,这部分碳汇量包括直接减排和间接增汇<sup>[35]</sup>。前者指通过沼气池的使用,有效管理人畜粪便,减少其温室气体的排放。后者指使用节柴灶和沼气池后,减少对森林砍伐,而达到保护植被的增汇作用。但由于农户多沼气池或节柴灶使用管理不善,导致这部分的减排量不稳定,监测困难。因此下阶段应加强对沼气池和节柴灶的规范管理,农户使用技术培训,加强对准确可行的监测方案的开发研究。

④开展岩溶系统内碳循环的机理研究,即岩溶系统内,植被层、土壤层、岩溶作用、社区节能减排之间的碳循环机理。在岩溶石漠化治理地区更应该加强石漠化治理与岩溶系统内碳循环之间的关系的研究,探索石漠化综合治理对增强岩溶生态系统碳汇效应的机理。

(3)探索增强岩溶石漠化治理地区固碳增汇效应途径的研究<sup>[36]</sup>。通过试验基地的研究,研究不同土地利用方式、不同植被、不同人为措施等的碳汇效应,探索既有利于石漠化治理又能发挥最大固碳增汇效应的综合措施。

(4)在对岩溶系统碳循环机理深入研究的基础上,研究开发适合岩溶系统的可操作的碳汇计量模型,为国际上的碳交易做理论和技术上的准备。

#### 参考文献

- [1] 王庆锁,李博.鄂尔多斯沙地油蒿群落生物量初步研究[J]. 植物生态学报,1994,18(4):347-353.
- [2] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等.人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J]. 应用生态学报,2002,13(5):530-532.
- [3] 胡建忠.黄河上游退耕地人工林的碳储量研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(6):2-3.
- [4] 贺庆棠.用生物量法对植物群体太阳能利用率的初步估算[J]. 北京林业大学学报,1986,8(3):52-59.
- [5] 马钦彦,陈惠林,王娟,等.华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):96-100.
- [6] 金峰,杨浩,蔡祖聪,等.土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. 土壤学报,2001,38(4):524-525.
- [7] 解亮丽,孙波,周慧珍.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报,2004,41(1):36.
- [8] 高贵龙,邓自民,熊康宁,等.喀斯特的呼唤与希望:贵州喀斯特生态环境建设与可持续发展[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2003,1-5.
- [9] 徐艳,张凤荣,段增强,等.区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 应用生态学报,2005,36(6):836-839.
- [10] 张勇,史学正,于东升,等.滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究[J]. 土壤学报,2009,46(3):526-531.
- [11] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002,26-27.

- [12] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 349—350.
- [13] Woodwell G. M. et al. The biota and world carbon budget. *Science*, 1978, 199: 141—146.
- [14] Post W M, Peng T H, Emanuel W R. et al. The Global Carbon Cycle[J]. *American Scientist*, 1990, 78: 310—326.
- [15] Prentice KC, Fung IY. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change[J]. *Nature*, 1990, 346: 48—51.
- [16] Adams J. M., Faure H. Faure-Denaro L. et al. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present[J]. *Nature*, 1990, 348: 711—714.
- [17] Sundquist E. T. The global carbon dioxide budget [J]. *Science*, 1978, 259: 934—941.
- [18] 田中正之, 石广玉, 李昌明译. 地球在变暖[J]. 气象出版社, 1992: 1—132.
- [19] Robert. K. Dixon. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. [C]//Proceedings of the Tsukuba global carbon cycle work shop global environment Tsukuba, 95. 1995: 117—119.
- [20] Foley JA. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget[J]. *Tell us*, 1995, 47(B): 310—319.
- [21] King A W, Emanuel WR, Wullschlegel SD, et al. A search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Tell us*, 1995, 47 (B): 501—519.
- [22] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(1): 73—79.
- [23] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 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.
- [24] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 14—15.
- [25] 李德意, 吴仲民, 普庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究[J]. 生态学报, 1998, 18(4): 371—378.
- [26] 杜红梅, 王超, 高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 756—759.
- [27] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 358—367.
- [28] 王丹丹, 史学正, 于东升. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1049—1053.
- [29] 盈斌. 岩溶地区土地利用、石漠化与治理工程设计[D]. 贵州师范大学, 2009, 29—30.
- [30] 李晓明. 中国地质碳汇监测计划启动[N/OL]. 科学时报, 2010-03-01. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2010/3/228888.shtml? id=228888>.
- [31] 袁道先, 蒋忠诚. IGCP379“岩溶作用与碳循环”在中国的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(1): 49—51.
- [32] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 425—432.
- [33] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 316—324.
- [34] 袁道先. 新形势下我国岩溶研究面临的机遇和挑战[J]. 中国岩溶, 2009, (4): 291—292.
- [35] 段茂盛, 王革华. 畜禽养殖场沼气的温室气体减排效益及利用清洁发展机制(CDM)的影响分析[J]. 太阳能学报, 24(3): 386—389.
- [36] 周运超, 潘根兴, 张平究, 等. 添加有机物料对岩溶系统中碳转移及灰岩溶蚀的影响研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(3): 153—158.

## Study on the carbon-sink effect by treatment to karst rock desertification — An analysis in light of field monitoring data

CHEN Wei-jie, XIONG Kang-ning, REN Xiao-dong, ZHOU Wen-long  
(*Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China*)

**Abstract:** In order to explore the effect of carbon-sink by treatment to karst rock desertification, three small catchments in Guizhou Province, including Shiqiao, Wangjiazhai-Yangchangdong and Dingtan, are taken as the study objects. In light of field monitoring data, the total carbon storage in each catchment is calculated; the distribution of carbon storage in different carbon pools and under different desertification grades is compared. It is found that the total carbon storage in 3 study catchments is only 32 434. 9tC; the carbon storage distribution in each carbon pool is: soil ≫ vegetation (herbage ≫ bush) and under different desertification grade is: slight rock desertification > moderate rock desertification > intensity rock desertification; the carbon density distribution in the study catchments is: Shiqiao small catchment > Wangjiazhai-Yangchangdong small catchment > Dingtan small catchment. Besides, a series of prospect to enhance the carbon sink research is proposed by the author, such as increase carbon sink monitoring indicators in future rock desertification control plan, extend the research borderline of carbon sink, improve the basic research in the carbon sink effect of karstification.

**Key words:** rock desertification control; carbon sink; carbon cycle; environment change; Guizhou Province