

贵州岩溶峡谷区石漠化对土壤碳库的影响

郭红艳^{1,2}, 崔明², 周金星^{1,2*}, 但新球³, 丁访军⁴, 吕相海⁵

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 国家林业局中南林业调查规划设计院, 湖南长沙 410014; 4. 贵州省林业科学研究院, 贵州贵阳 550011; 5. 中国国际工程咨询公司, 北京 100048)

摘要: 研究以喀斯特典型区贵州省关岭布依族苗族自治县花江峡谷区为例, 对未石漠化土地和不同程度石漠化土地中的土壤有机碳和无机碳进行了测定, 并计量分析了石漠化治理对土壤碳库的影响。结果表明: (1) 未石漠化土地的土壤平均碳库总量比石漠化土地的高, 石漠化土地的土壤平均碳库总量主要受植被类型和土层深度的影响, 其影响程度大于石漠化程度的影响; (2) 土地平均碳密度则与石漠化影响程度呈显著的负相关关系, 即呈非石漠化土地 > 潜在石漠化土地 > 石漠化土地, 轻度石漠化土地 > 中度石漠化土地 > 重度石漠化土地 > 极重度石漠化土地的变化规律; (3) 通过石漠化综合治理工程, 关岭县未石漠化土地和不同程度石漠化土地的面积发生了明显变化, 对治理工程的碳汇效益计量分析表明, 碳库增加量为 $724.00 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 仅增加的有机碳价值可达 $51.36 \text{ 万元} \cdot \text{km}^{-2}$, 治理效果显著。

关键词: 岩溶石漠化; 土壤碳库; 花江峡谷区; 关岭县

中图分类号: S718.42

文献标识码: A

Influence of Karst Rocky Desertification on Soil Carbon Pool in Guizhou Karst valley region

GUO Hong-yan^{1,2}, CUI Ming¹, ZHOU Jin-xing^{1,2*}, DAN Xin-qiu³, DING Fangjun⁴,
LV Xiang-hai⁵

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Central South Forest Inventory and Planning Institute of State Forestry Administration, Changsha 410014, Hunan, China; 4. Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang 550011, Guizhou, China; 5. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The paper takes karst valley region as study area to assess the influence of rocky desertification management on soil carbon pool for the first time. We selected the Huajiang karst gorge in Guanling County of Guizhou Province as the sampled field, which is a typical rocky desertification region, soil organic and inorganic carbon content of the soil samples from non-rocky desertification land and rocky desertification land were tested respectively, and carbon densities were calculated. The results showed that: (1) the average soil carbon storage of non-rocky desertification land is higher than that of rocky desertification land, and the average carbon storage in soil profiles of rocky desertification land has less relation with the degree of rocky desertification than with vegetation type and soil depth; (2) the average carbon density decreases as the seriousness of rocky desertification increases, none > potential > slight > moderate > serious > significantly serious; (3) soil quality was improve by the Rocky Desertification Comprehensive Management Project in the past years, according to the areas of non-rocky desertification land and

收稿日期: 2013-06-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号 CAFYBB2014ZD006)、国家林业局科技项目“石漠化治理监测与评价”(编号 2011-LY-036)

作者简介: 郭红艳, 博士, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治、石漠化治理研究. E-mail: guohongyan1024@163.com

* 通讯作者: 教授、博士生导师, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治、石漠化治理与生态修复. E-mail: zjx9277@126.com

rocky desertification changed in Guanling County, the total soil carbon storage increased by 724 t per square kilometer, in which, the value of organic carbon increased 513600 yuan per square kilometer.

Key words: karst rocky desertification; soil carbon pool; Huajiang Karst Valley; Guanling county

土壤是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库,由有机碳(SOC)库和无机碳(SIC)库两大部分组成,前人研究结果显示,全球土壤有机碳库和无机碳库储量分别约为1 550 Pg和750 Pg^[1]。土壤碳库的总量是大气碳库的3倍,是地球表层最大的碳库^[2],因此,土壤碳库在全球碳循环中具有举足轻重的作用,其中,SOC数量和质量的动态变化可通过活性有机碳的变化进行监测^[3-5]。我国西南岩溶地区石漠化导致的土地退化严重、土壤质量下降,对土壤碳库影响很大。岩溶生态系统土地退化的实质是土壤作为水库、养分库和土壤种子库功能的差异退化^[6]。石漠化是指在热带、亚热带湿润、半湿润气候条件和岩溶极其发育的自然背景下,受人为活动干扰,使地表植被遭受破坏,导致土壤严重流失,基岩大面积裸露或砾石堆积的土地退化现象,是岩溶地区土地退化的极端形式^[7]。我国石漠化集中分布在贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东8省(区、市)。近年来,国家开展了大规模的石漠化治理工程,采取了封山育林、退耕还林、坡改梯等一系列生物与工程措施,使岩溶石漠化地区生态环境得到了初步改善,但局部地区随着岩溶石漠化的发生发展,地表植被退化、土壤质量下降现象明显。土壤对土地利用变化的反应也是极其敏感的。土壤有机碳是地球表面最大的有机碳库,在岩溶区与植被覆盖度和石漠化程度呈显著相关,土地利用方式可直接影响土壤有机碳含量,研究石漠化过程中土壤有机碳的变化特征,可为石漠化治理提供科学依据^[8-10]。本文针对我国西南岩溶地区土地石漠化严重导致的土地退化、土壤质量下降如何影响土壤碳库的问题,在石漠化典型地区——贵州省关岭布依族苗族自治县花江峡谷区测定了未石漠化土地和不同程度石漠化土地的土壤有机碳和无机碳,并计算了平均碳密度。通过关岭县治理前后土地石漠化程度和面积变化的监测数据,定量评价了石漠化对区域土壤碳库总量的影响。

1 研究区概况

关岭布依族苗族自治县位于贵州省中部偏西南、安顺市西部,地处珠江上游的北盘江段东岸,是

典型的岩溶地区(105°15′~105°49′E,25°34′~26°05′N),国土面积1 468 km²。东北与镇宁自治县相邻,西南以北盘江为界与晴隆、兴仁、贞丰三县隔河相望,西北毗连六枝特区。全县辖8镇6乡,共14个乡(镇),241个行政村。地貌类型复杂多样,地势起伏大,碳酸盐岩类分布广泛;多年平均气温16.2℃、年降水量1 265.1~1 656.8 mm;土壤受地势、地貌、气候、生物等成土因素的影响,具有垂直地带性分布、镶嵌性分布;境内水资源虽然丰富,但地表水比降大,水流湍急,洪水急剧涨落,易发生洪涝灾害。

全县总人口36.68万人,其中,农业人口33.21万人,贫困人口8.68万人,分别占总人口的90.53%、23.66%;农业劳动力人口18.43万人;少数民族人口19.33万人,占总人口的52.7%,有布依族、苗族、仡佬族、彝族、京族等23个少数民族,布依族和苗族人口最多。农业人口密度大、人口较为密集、贫困人口较多,人均耕地少,难以利用的土地多,人地矛盾突出,加剧了土地石漠化。

2 研究方法

2.1 土地类型的划分与样地概况

样地选在贵州省关岭布依族苗族自治县的花江峡谷示范区,是贵州高原峡谷地貌结构的典型代表,在生态环境上反映了贵州喀斯特地区北部典型的温热山地气候,属于贵州喀斯特石山区的典型峡谷地貌,当地土地石漠化现象非常严重。

参照国家林业局《岩溶地区第二次石漠化监测》^[13]中的分级标准,岩溶地区土地类型分为未石漠化土地和石漠化土地两大类,前者又分为非石漠化土地和潜在石漠化土地两类,后者又分为不同程度的石漠化土地,分别为轻度、中度、重度和极重度石漠化土地。符合下列条件之一的为非石漠化土地:(1)基岩裸露度(或石砾含量)<30%的有林地、灌木林地、疏林地、未成林造林地、无立木林地、宜林地;(2)苗圃地、林业辅助生产用地;(3)基岩裸露度(或石砾含量)<30%的旱地;(4)水田;(5)基岩裸露度(或石砾含量)<30%的未利用地;(6)建设用地;(7)水域。潜在石漠化土地为基岩裸露度(或石

砾含量) $\geq 30\%$, 且符合下列条件之一的: (1) 植被为乔灌草型、乔灌型、乔木型和灌木型, 植被综合盖度 $\geq 50\%$ 的有林地、灌木林地; (2) 植被为草丛型, 植被综合盖度 $\geq 70\%$ 的牧草地、未利用地; (3) 梯土化旱地。

基岩裸露度(或石砾含量) $\geq 30\%$, 且符合下列条件之一者为石漠化土地。(1) 植被为乔灌草型、乔灌型、乔木型和灌木型, 植被综合盖度 $< 50\%$ 的有林地、灌木林地, 以及未成林造林地、疏林地、无立木林地、宜林地、未利用地; (2) 植被为草丛型, 植被综

合盖度 $< 70\%$ 的牧草地、未利用地; (3) 非梯土化旱地。依据评定因子及指标将石漠化分为: 轻度、中度、重度和极重度。评定石漠化程度的因子包括基岩裸露程度、植被综合盖度、植被类型和土层厚度。评定石漠化程度的方法: 先将以上 4 因子科学地分为不同的程度并量化, 再对被调查地(小班)的以上 4 因子逐一确定程度并记录量化值, 并求出该调查小班的 4 项量化值的和, 最后与划定的石漠化程度区分段进行比较, 确定该小班的石漠化等级。各评定因子及指标评分见表 1, 研究区样地基本情况见表 2。

表 1 石漠化程度评分标准

岩基裸露度		植被类型		植被综合盖度		土层厚度		综合评分	
程度	评分	类型	评分	程度	评分	程度	评分	程度	评分
30% ~ 39%	20	乔灌草型	2	30% ~ 49%	8	I 级	1	轻度	≤ 45
40% ~ 49%	26	乔灌型	4	20% ~ 29%	14	II 级	3	中度	46 ~ 60
50% ~ 59%	32	乔木型	6	10% ~ 19%	20	III 级	6	重度	61 ~ 75
60% ~ 69%	38	灌木型	8	< 10%	26	IV 级	10	极重度	> 75
$\geq 70\%$	44	草丛型	11						
		旱地作物型	15						
		无植被型	20						

表 2 研究区样地基本情况

分类	地上植被	海拔/m	主要植物	覆盖度/%	土壤厚度/cm
非石漠化	车桑子、白刺花、圆叶乌桕、香椿	736 ~ 746	车桑子、白刺花	90	≤ 50
潜在石漠化	茅根草、飞蓬、钩毛草、土烟、土木香、棣棠花、山黄麻、金盏银盘、粗糠柴、莴苣、类芦、鹅观草、白绒草、飞蛾藤、铁线莲、圆叶乌桕、香椿、油桐、盐肤木幼苗、圆果化香幼苗、花椒、瓜木、地瓜	700 ~ 710	茅根草	70	≤ 40
轻度石漠化	花椒、柚木	590 ~ 510	柚木	60	≤ 30
中度石漠化	花椒	590 ~ 510	花椒	40	≤ 30
重度石漠化	茅根草	590 ~ 510	茅根草	20	≤ 20
极重度石漠化	无	590 ~ 510	无	10	≤ 20

注: 车桑子(*Dodonaea viscosa* (Linn.) Jacq.)、白刺花(*Sophora davidii* (Franch.) Skeels.)、圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium* Hemsl.)、香椿(*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.)、茅根草(*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv.)、飞蓬(*Erigeron acer* Linn.)、钩毛草(*Pseudechinolaena polystachya* (H. B. K.) Stapf.)、土烟(*Solanum erianthum* D. Don.)、土木香(*Inula helenium* Linn.)、棣棠花(*Kerria japonica* (Linn.) DC.)、山黄麻(*Trema tomentosa* (Roxb.) Hara.)、金盏银盘(*Bidens biternata* (Lour.) Merr. et Sherff.)、粗糠柴(*Mallotus philippensis* (Lam.) Muell. Arg.)、莴苣(*Lactuca sativa* Linn.)、类芦(*Neyraudia reynaudiana* (Kunth.) Keng.)、鹅观草(*Roegneria kamoji* Ohwi.)、白绒草(*Leucas mollissima* Wall.)、飞蛾藤(*Porana racemosa* Roxb.)、铁线莲(*Clematis florida* Thunb.)、油桐(*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw.)、盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、圆果化香树(*Platycarya longipes* Wu.)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)、瓜木(*Alangium platanifolium* (Sieb. et Zucc.) Harms.)、地瓜(*Ficus tikoua* Bur.)、柚木(*Tectona grandis* Linn. f.)

2.2 取样方法与指标测定

试验于 2012 年 6 月进行土壤样品采集, 分别挖取土壤剖面, 对不同深度的土壤进行采样, 采样深度为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 cm 到基岩(根据实际情况进行采样), 在挖取的土壤面按边长为 20 cm 的等边三角形进行 3 点采样, 采样后将之混合为 1 个样品, 每个样地各有 3 个重复。在非石漠化样地中根据植被情况分别对灌草、灌木地、草本地和裸地土壤进行采样; 在潜在石漠化样地, 分别在乔木、灌草、草本和裸

地土壤进行采样; 不同程度石漠化样地则采集裸地的土壤样品。采样结束后, 将土样晾干并拣出杂物后, 送到贵州林科院土壤检测中心进行检测, 测定指标包括土壤有机碳、土壤活性有机碳(易氧化有机碳)、土壤无机碳(碳酸钙含量)。

土壤有机碳密度的计算公式:

$$SOCD = \sum (1 - \theta_i \%) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$, SOC 为土壤剖面有机碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); θ_i 为第 i 层 $> 2 \text{ mm}$ 砾石含量(体积分

数%); ρ_i 为第*i*层土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为第*i*层土壤有机碳密度($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);土壤有机碳含量是土壤有机质含量乘以0.58(Bemmelen转换系数)得到^[14], T_i 为第*i*层土层厚度(cm)。无机碳密度根据有机碳密度的公式计算,不同的是将公式中的 C_i 转换成无机碳含量,无机碳含量是将土壤中的 CaCO_3 含量乘以0.12(碳酸钙中碳的含量),其他各项不变,估算出无机碳密度。

非石漠化样地中,平均碳密度按照样地中灌草面积36%、灌木面积27%、草地面积18%、裸地面积9%的比例进行计算;潜在石漠化样地中,平均碳密度按照样地中乔木面积3.5%、灌草面积14.0%、草地面积28.0%、裸地面积24.5%的比例计算;不同程度石漠化土地中,平均碳密度按照轻度、中度、重度、极重度样地中土被覆盖度进行计算(表2)。本文的土壤碳库指土壤有机碳库和无机碳库总量。

土壤有机碳由不同稳定性的组分组成,其概念性库包括活跃、慢性和惰性库^[15];在不同性质的组分中,活性土壤有机碳是最活跃、周转最快、最易被生物直接利用的,也是养分循环中具有重要作用的部分^[16]。花江峡谷区的石漠化主要由陡坡开垦和滥砍滥伐造成的^[17],这对植被生物量产生较大影响,研究石漠化过程中土壤活性有机碳的变化特征,可从机理上揭示石漠化过程中土壤退化的本质^[18]。基于土壤活性有机碳的性质和重要作用,其成为当前土壤碳和养分循环方面的研究热点^[19],可用化学和物理方法进行测定,用化学方法测定的称之为易氧化有机碳^[20-21],本试验以土壤易氧化有机碳来表征活性有机碳。

2.3 数据处理与分析

所有的采集和测试数据均输入 Excel 2003 软件存储,应用 Excel 软件对数据进行绘图。采用

spss11.5 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),应用最小显著差异法(LSD)对不同数据组间进行显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 岩溶区不同土地类型的土壤有机碳

3.1.1 未石漠化土地土壤有机碳含量 从图1看出:在同一个样地内,不同植被类型的土壤有机碳存在较大差异,灌草地的土壤有机碳最高,从地表到20 cm深处,有机碳比较均匀,20~50 cm处明显下降,整个土层剖面的平均值为 $26.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而灌木地明显比灌草地的低,其土层均值为 $18.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;草地的表层土壤有机碳是所有数据中最高的,达到 $34.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但从10 cm土层往下,迅速下降,土层剖面的均值为 $18.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;裸地各个土层的有机碳相对均较低,均值为 $14.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从纵向看,草地的表层土壤有机碳最高,当草地恢复为灌草或灌木时,有机碳降低。

图1所示:非石漠化土地不同植被类型土壤中,易氧化有机碳量均呈现从地表到地下递减的变化趋势。灌草地易氧化有机碳最高,均值达到 $1.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳的5.64%;灌木地和草地相比,由于草地表层土壤易氧化有机碳较高,均值略高于灌木地,灌木地的均值为 $0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占有有机碳的5.04%,草地的均值为 $1.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占有有机碳的5.98%;裸地的分层特征不太明显,各个土层的易氧化有机碳差别较小,均值仅为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅占有有机碳的4.12%。方差分析结果表明:非石漠化土地不同地表植被类型的有机碳和易氧化有机碳差异显著($P < 0.05$),同一地表植被类型不同土壤深度的有机碳和易氧化有机碳同样差异显著($P < 0.05$)。

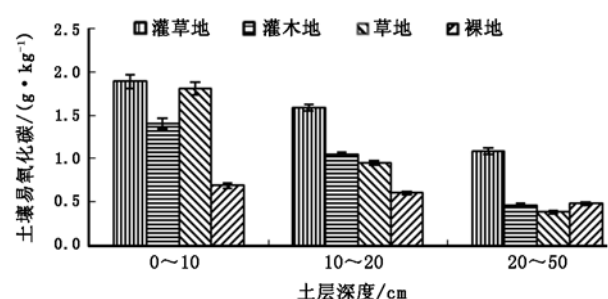
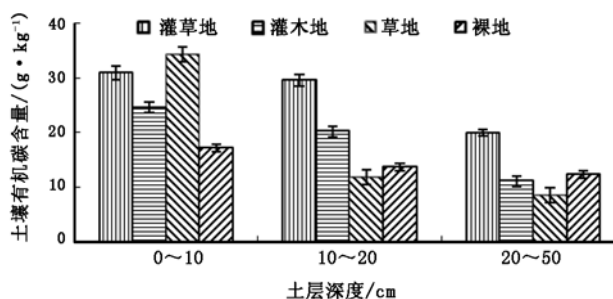


图1 非石漠化土地不同深度土壤有机碳和易氧化有机碳含量

潜在石漠化土地是生态脆弱性较高的土地类型,虽然没有发生石漠化,但一旦遭受人为破坏或自

然灾害,极有可能退化为石漠化土地。从图2看出:潜在石漠化土地乔木林不同深度的土壤有机碳差别

较小,且有先减小后增大的变化趋势,但差异不显著,整个土层的有机碳均值为 $26.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;灌草地的有机碳最高,表层土壤达到 $38.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,也呈现出先降低后增加的趋势,这可能与植被的演替过程有关;草地不同土层的有机碳变化幅度较小,均值为 $24.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而裸地的则显著低于其他3个类型,均值只有 $14.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

潜在石漠化土地中,易氧化有机碳从上到下呈现递减趋势(图2)。乔木地表层10 cm内的易氧化有机碳明显比10 cm以下的高,为 $1.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,底层为 $1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $1.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳

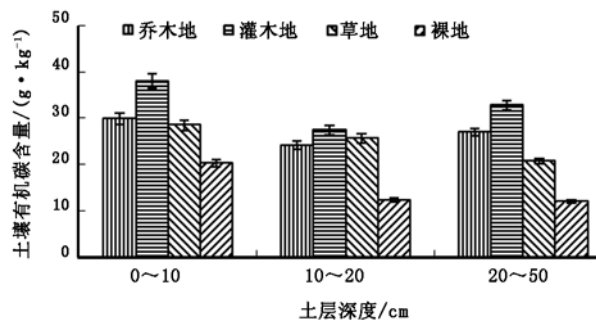
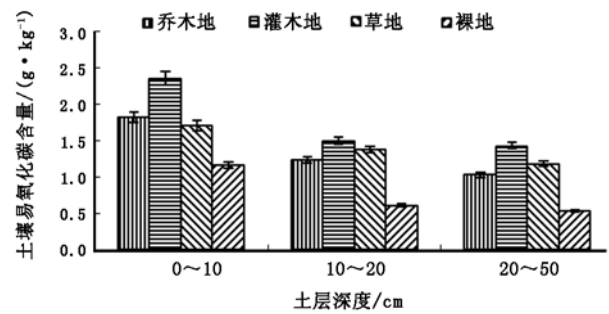


图2 潜在石漠化土地不同深度土壤有机碳和易氧化有机碳含量

的 5.02% ;灌草地的最高,地表10 cm内的易氧化有机碳为 $2.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是潜在石漠化土地样地中含量最高的,均值为 $1.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳的 5.35% ;草地的与乔木地的差异较小,10 cm以下的高于乔木地的,均值为 $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳的 5.70% ;裸地的最小,均值仅为 $0.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳的 5.07% 。潜在石漠化土地不同地表植被类型的有机碳和易氧化有机碳的差异均显著($P < 0.05$),同一地表植被类型不同深度土壤的有机碳和易氧化有机碳的差异也显著($P < 0.05$)。



3.1.2 石漠化土地的土壤有机碳 从图3明显看出:轻度石漠化土地不同深度的土壤有机碳的差异较小,均值为 $15.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;中度石漠化土地的土壤有机碳含量均值仅为 $9.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;重度和极重度石漠化土地不同土层的差别较小。石漠化程度较高的土地,其土壤有机碳未必是最低的,其土壤养分情况可能优于石漠化程度较低的土地,这与其他研究者的研究结果类似,重度石漠化土地的土壤有机碳含量高于中度石漠化土地的^[18]。发生石漠化的土壤有机碳与未发生石漠化的差异显著。

图3显示:轻度石漠化土地的易氧化有机碳含

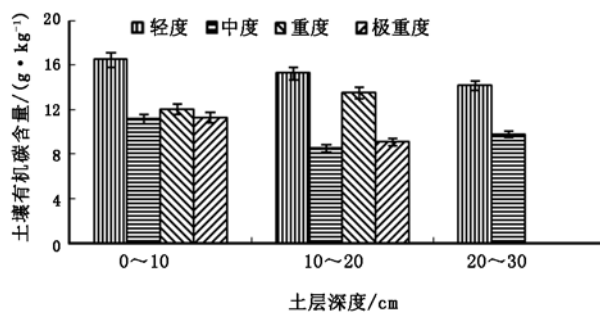
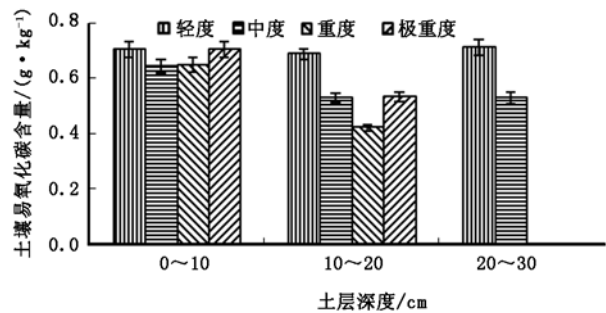


图3 不同程度石漠化土地不同深度土壤有机碳和易氧化有机碳含量

3.2 岩溶区不同土地土壤无机碳含量

图4显示:在未石漠化土地中,非石漠化土地的

量比较均匀,平均值约维持在 $0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳含量的 4.59% ;中度石漠化土地10 cm土层内的含量比10~30 cm的略高,平均值为 $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占有有机碳含量的 5.80% ;重度石漠化土地和极重度石漠化土地的易氧化有机碳的平均含量分别为 0.53 、 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别占有有机碳含量的 4.25% 和 6.06% 。不同程度石漠化土地不同地表植被类型的有机碳和易氧化有机碳含量的差异均显著($P < 0.05$),同一地表植被类型不同土壤深度的有机碳和易氧化有机碳含量的差异均不显著。



土壤无机碳相对较高,呈现出随土层的加深递增的变化趋势,草本地最高,0~10、10~20、20~50

cm 的土壤无机碳含量分别为 16.89、18.67、20.61 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 18.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是灌木地, 其均值为 13.10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 灌木林地 8.43 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 裸地的含量最小, 均值仅为 3.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。非石漠化土地不同植被类型的无机碳差异显著 ($P < 0.05$), 同一植被类型不同土壤深度的无机碳含量除灌草地外, 均差异显著 ($P < 0.05$)。

潜在石漠化土地中, 乔木林地土壤无机碳的含量无明显分层变化, 变化范围为 3.01 ~ 3.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 3.36 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 灌木地 0 ~ 10 cm 的无机碳含量较高, 约为 10 ~ 50 cm 含量的 2 倍, 其均值为 5.45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 草地无明显变化, 平均值约 4.62 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 裸地的无机碳最高, 且 10 ~ 50 cm 的无机碳约为 0 ~ 10 cm 含量的 2 倍以上, 均值为 9.90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。潜在石漠化土地不同植被类型的无机碳差异显著 ($P < 0.05$), 同一植被类型不同土壤深度的无机碳含量乔木地和草地差异不显著, 灌木地和裸地差异显著 ($P < 0.05$)。

在石漠化土地类型中, 轻度石漠化土地无机碳含量为 2.56 ~ 2.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 2.70 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 中度石漠化土地的无机碳含量变化范围为 1.27 ~ 1.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 1.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 重度石漠化土地 0 ~ 10 cm 土壤无机碳含量比 10 ~ 20 cm 的高, 说明其地表的土壤成分发生了较大改变; 极重度石漠化土地土壤无机碳的平均含量为 1.54 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4)。不同程度石漠化土地不同植被类型的无机碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 除轻度石漠化土地外, 同一植被类型不同土壤深度的无机碳含量差异均显著 ($P < 0.05$)。

3.3 岩溶区不同土地的平均碳密度

3.3.1 未石漠化土地的平均碳密度 由表 3 可知: 非石漠化土地样地中灌草地的平均有机碳密度和平均活性有机碳密度均最高, 裸地的最小, 灌木地的平均有机碳密度略高于地草地的, 其活性有机碳度略低于草地的, 植物对土壤的平均有机碳含量影响很大, 植物种类越丰富, 土壤的固碳能力越强。测定结果显示: 草地的平均无机碳密度高于其他的类型, 裸地的平均无机碳密度最小。潜在石漠化土地乔木地的平均有机碳密度低于灌草地的, 说明灌草对土壤的改良作用优于乔木, 草地的明显高于裸地的; 乔木地的平均活性有机碳密度和草地的相差不大, 灌草地的最高; 裸地的平均无机碳密度最大, 乔木地的最小。在研究区, 非石漠化土地的平均碳密度远高于

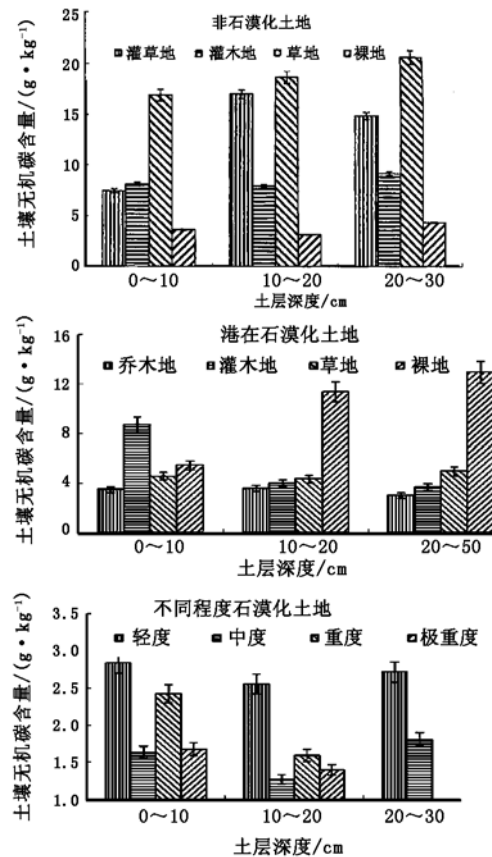


图4 非石漠化土地、潜在石漠化土地、不同程度石漠化土地的土壤无机碳含量

潜在石漠化土地的, 土地退化将影响土地的碳库储存能力。

3.3.2 石漠化土地平均碳密度 轻度和中度石漠化土地的土壤碳密度高于其他程度的, 而极重度石漠化土地的土壤碳密度却比重度石漠化土地的高, 这是由于在实际调查中, 极重度石漠化土地样地的土壤质量优于重度石漠化土地的, 在石漠化程度的判定标准中, 没有涉及土壤的质量指标, 重度和极重度石漠化土地虽然土层厚度小于中度石漠化土地, 但由于岩石裸露率高, 土壤基本上是雨水冲刷而来的表层土壤且存在于石沟、石缝或较小面积的石台上。这些土壤比较疏松, 营养较丰富, 有些植物生长于石缝中。总的来讲, 平均碳密度是随石漠化程度的加剧而减小, 如轻度石漠化土地的平均有机碳密度分别是中度、重度、极重度的 2.20、6.58、7.90 倍 (表 3)。

表3 岩溶区土地的平均碳密度

 $t \cdot km^{-2}$

项目	非石漠化土地				潜在石漠化土地				石漠化土地									
	灌草地	灌木地	草地	裸地	土地平均碳密度	乔木地	灌草地	草地	裸地	土地平均碳密度	轻度	土地平均碳密度	中度	土地平均碳密度	重度	土地平均碳密度	极重度	土地平均碳密度
有机碳密度	12 275.32	8 118.82	7 930.9	6 944.2	8 663.74	7 290.82	12 581.10	5 863.52	4 033.47	4 646.52	3 184.6	1 910.76	2 168.51	867.41	1 452.49	290.5	2 419.93	241.99
活性有机碳密度	691.62	408.78	445.46	286.42	465.31	374.36	654.43	328.38	186.04	242.25	150.69	90.42	125.71	50.28	90.56	18.11	147.43	14.74
无机碳密度	6 650.98	4 268.11	10 758.02	1 924.67	5 656.41	905.43	1 984.32	1 247.09	4 187.57	1 684.64	567.49	340.49	361.83	144.73	215.84	43.17	364.77	36.48
小计					14 320.15					6 331.16		2 251.25		1 012.14		333.67		278.47

3.4 石漠化对关岭县土地碳库影响的评价分析

2005年—2010年关岭县实施了石漠化综合治理工程,试点工程完成治理石漠化面积60.96 km²。完成封山育林18.48 km²,防护林31.38 km²,种植有花椒、金银花(*Lonicera japonica* Thunb)、核桃(*Juglans regia*)、樱桃(*Cerasus pseudocerasus* G. Don)、李子(*Prunus salicina* Lindl)、桃树(*Amygdalus persica* L. var. *aganopersica* Reich. Fl. Germ. Excurs)、梨树(*Pyrus bretschneideri* Rehd)等经果林12.47 km²;同

时实施人工种草、进行坡改梯和蓄水池的修建。经过3年的治理,森林覆盖率达33.4%,林草覆盖率39.8%。通过实施石漠化综合治理工程,石漠化土地有正向变化,也有逆向变化,通过计算可得出土地碳库的变化量(表4)。关岭县通过实施石漠化治理工程,共增加碳946 401 t,单位土地面积的碳增量为724 t · km⁻²,其中,有机碳增加428 t。按照瑞典的碳税率150美元 · t⁻¹(折合人民币1 200元 · t⁻¹)计,则增加的有机碳价值为51.36万元 · km⁻²。

表4 关岭县2005—2010年岩溶区土地碳库动态变化

土地类型	土地面积变化量/km ²	平均碳密度/(t · km ⁻²)		碳储量/t			
		有机碳密度	无机碳密度	有机碳库	无机碳库	小计/t	
未石漠化土地	非石漠化	69.06	8 663.74	5 656.41	598 317.900	390 631.700	988 949.6
	潜在石漠化	2.07	4 646.52	1 684.64	9 618.296	3 487.205	13 105.5
	轻度	12.21	1 910.76	340.49	23 330.38	4 157.383	27 487.8
石漠化土地	中度	-78.14	867.41	144.73	-67 779.400	-11 309.200	-79 088.6
	重度	-55.72	290.50	43.17	-16 186.700	-2 405.430	-18 592.1
	极重度	52.21	241.99	36.48	12 634.300	1 904.621	14 538.9

4 结论

(1)土壤有机碳与植被类型有关,反映了土壤质量的好坏,有机碳的增加有利于土地立地条件的改善。未石漠化土地中,非石漠化土地灌草(26.76 g · kg⁻¹)、灌木(18.60 g · kg⁻¹)、草地(18.12 g · kg⁻¹)、裸地(14.35 g · kg⁻¹)的土壤平均有机碳含量依次减少;潜在石漠化土地的土壤平均有机碳含量从高到底的植被类型依次为灌木(32.72 g · kg⁻¹)、乔木(26.96 g · kg⁻¹)、草地(24.91 g · kg⁻¹)、裸地(14.80 g · kg⁻¹)。不同程度石漠化土地中,土壤平均有机碳含量轻度(15.33 g · kg⁻¹) > 重度(12.77 g · kg⁻¹) > 极重度(10.17 g · kg⁻¹) > 中度(9.81 g · kg⁻¹),程度较高石漠化土地中土壤的质量有可能比程度较低石漠化土地的高,土壤有机碳不能反映土地的石漠化状况,还应考虑土壤的生物学特性。未石漠化土地的土壤平均有机碳含量比石漠化土地的大。基于此,本文认为,在非石漠化

土地中,较高配置层次的植被类型有利于提高土壤的碳库储存能力,而在潜在石漠化土地中,草地增加表层土壤有机碳的能力优于其他植被类型。

(2)岩溶区土地的平均碳密度(有机碳和无机碳)与植被类型、土层深度、地被覆盖度有关,具有高度的空间变异性。土地平均碳密度遵循非石漠化土地(14 320.15 t · km⁻²) > 潜在(6 331.16 t · km⁻²) > 轻度(2 251.25 t · km⁻²) > 中度(1 012.14 t · km⁻²) > 重度(333.67 t · km⁻²) > 极重度(278.47 t · km⁻²),可为岩溶区碳库管理提供参考。

(3)岩溶地区的石漠化过程是一个土壤碳库减少的过程,而石漠化综合治理工程可增加区域土壤碳储量,因此,石漠化综合治理可扭转植被的逆演化过程,增强土壤的碳库能力。石漠化综合治理工程在关岭布依族苗族县起到了良好的积、极的生态环境改良作用:有机碳增加了428 t · km⁻²,相对应的价值为51.36万元。在今后的研究中,计算出不同土地的植物固碳量和碳排放量,则可得出石漠化综

合治理后区域增加的固碳量及固碳价值,以评价石漠化的治理效果。

参考文献:

- [1] Lal R, Kimble J M. Inorganic carbon and the global C cycle: research and development priorities. *Global Climate Change and Pedogenic Carbonate* [M]. New York: Lewis Publishers, 2000: 291-302.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 151-163.
- [3] Soon Y K, Arshad M A, Haq A, *et al.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1): 38-46.
- [4] Belay-Tedla A, Zhou X, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [5] 唐国勇,李 昆,孙永玉,等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. *林业科学研究*, 2011, 24(6): 754-759.
- [6] 李阳兵,高 明,邵景安,等. 岩溶山区不同植被群落土壤生态系统特性研究 [J]. *地理科学*, 2005, 25(5): 705-802.
- [7] 国家林业局. 中国石漠化状况公报 [EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/uploadfile/main/2012-6/file/2012-6-15-147e8ffa780643d68d6126b67ae60d7b.pdf>, 2012, 06.
- [10] 刘 方,王世杰,刘元生,等. 岩溶石漠化过程土壤质量变化与生态环境影响评价 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 639-644.
- [11] 魏 媛,喻理飞,张金池. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物学特性 [J]. *林业科学*, 2008, 44(7): 6-11.
- [12] 罗海波,刘 方,刘元生,等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化 [J]. *林业科学*, 2009, 45(9): 24-28.
- [13] 国家林业局. 《岩溶地区石漠化监测技术规定》[G] 2011, 北京.
- [14] 文启孝. 土壤有机质研究方法 [M]. 北京:北京农业出版社, 1984: 316-318.
- [15] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, *et al.* Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. *Global biogeochemical cycles*, 1993, 7(4): 785-809.
- [16] Khanna P K, Ludwig B, Bausch J, *et al.* Assessment and significance of labile organic C pools in forest soils [M]. // Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* Assessment methods for soil carbon, advances in soil science. United States of America, CRC Press, 2000: 167-182.
- [17] 卢 彪,杨明刚. 关岭县板贵乡喀斯特石漠化成因及防治成效 [J]. *中国水土保持*, 2008(3): 52-54.
- [18] 卢红梅,王世杰. 喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响 [J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 12-17.
- [19] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Global change biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [20] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Crop and Pasture Science*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [21] 吕国红,周广胜,周 莉,等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用 [J], *气象与环境学报*, 2006, 22(2): 51-55.