

# 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征

黄先飞<sup>1,2,3</sup>, 周运超<sup>1,2,4</sup>, 张珍明<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学, 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025; 2. 贵州大学林学院, 贵阳 550025;  
3. 贵州师范大学山地环境重点实验室, 贵阳 550001; 4. 贵州普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100)

**摘要:** 为探究喀斯特土壤有机碳分布特征及其对人为干扰的响应, 挖掘了 2 854 个土壤剖面, 采集了 22 786 个土壤样品, 分析了贵州省不同土地利用方式下土壤有机碳分布规律; 并结合贵州省石漠化防治规划, 初步估算了石漠化防治工程的土壤碳增汇贡献。结果表明: 贵州省土壤有机碳呈现含量高、密度小的特征。表层土壤(0—20 cm)有机碳平均含量 25.07 g/kg, 平均密度仅为 4.27 kg/m<sup>2</sup>。不同用地类型土壤表层有机碳含量大小为灌木林地>乔灌木林地>灌草地>乔木林地>弃耕地与荒地>草地>水田>园地>旱地与坡耕地; 表层碳密度大小为水田>灌木林地>乔木林地>乔灌木林地>弃耕地与荒地>灌草地>旱地与坡耕地>草地>园地。0—60 cm 土层土壤有机碳含量对人为干扰较为敏感, 60—100 cm 土层土壤有机碳含量差异较小。实施退耕还林, 人工种草及人工造林等石漠化防治工程会明显促进土壤有机碳的积累, 到 2050 年, 贵州省 0—10, 0—20, 0—30, 0—100 cm 土层土壤有机碳将增加  $1.99 \times 10^{13}$ ,  $3.37 \times 10^{13}$ ,  $4.45 \times 10^{13}$ ,  $6.29 \times 10^{13}$  g。可见, 喀斯特地区土壤有机碳具有含量高、密度低的显著特征, 石漠化治理能有效增加喀斯特地区土壤碳汇。

**关键词:** 石漠化; 土壤有机碳; 土地利用; 碳汇; 环境政策; 喀斯特

**中图分类号:** S153.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2017)05-0215-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.034

## Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Under Different Land Uses in a Karst Rocky Desertification Area

HUANG Xianfei<sup>1, 2, 3</sup>, ZHOU Yunchao<sup>1, 2, 4</sup>, ZHANG Zhenming<sup>1, 2</sup>

(1. Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 3. Guizhou Key Laboratory of Mountain Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 4. Puding Karst Ecosystem Research Station of Guizhou Province, Puding, Guizhou 562100)

**Abstract:** To reveal the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and to study the influence of human activities on SOC in Karst area, 22 786 soil samples collected from 2 854 soil profiles were analyzed. Spatial distribution characteristics of SOC under different land uses in Guizhou Province were discussed. Combined with the control plan of rocky desertification in Guizhou Province, carbon sequestration caused by rocky desertification prevention and control was assessed. The results indicated that the SOC content in Guizhou was high, and the SOC density was low. The average SOC content in top soil (0—20 cm) was 25.07 g/kg, but the average SOC density was only 4.27 kg/m<sup>2</sup>. The SOC content of top soil in different land uses followed the order: shrub lands > arbor-shrub mixed forest lands > shrub grass lands > arbor forest lands > abandoned lands and uncultivated lands > grasslands > paddy lands > garden lands > arid lands and sloping croplands. The SOC density of top soil in different land uses descended in the order: paddy lands > shrub lands > arbor forest lands > arbor-shrub mixed forest lands > abandoned lands and uncultivated lands > shrub grass lands > arid lands and sloping croplands > grasslands > garden lands. The SOC content of top 60 cm soil was sensitive to human disturbance, and small discrepancies were observed among SOC contents of different land uses in deeper soil layers. If the rocky desertification prevention and control project (including returning farmland to forests, construction of artificial pasture, and artificial afforestation) was

收稿日期: 2017-05-03

资助项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956702); 贵州省科技计划项目(黔科合[ ]字 2014-2002-03); 贵州省百层次人才计划项目(2015-4022)

第一作者: 黄先飞(1983—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事环境科学研究。E-mail: hxfswjs@gznu.edu.cn

通信作者: 周运超(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事森林土壤碳固定及林木营养研究。E-mail: yczhou@gzu.edu.cn

carried out efficiently, the SOC storage in Guizhou Province would be obviously promoted. Up to year 2050, at calculating depth of 0–10, 0–20, 0–30 and 0–100 cm, the total SOC sequestration caused by this project would be up to  $1.99 \times 10^{13}$ ,  $3.37 \times 10^{13}$ ,  $4.45 \times 10^{13}$  and  $6.29 \times 10^{13}$  g. In conclusion, the SOC of Karst areas was characterized by high content and low density, and the implementation of the rocky desertification prevention and control project was propitious to carbon sequestration in Karst areas.

**Keywords:** rocky desertification; soil organic carbon; land use; carbon sink; environment policy; Karst

全球变暖是人类面临的严峻问题,土壤有机碳是土壤质量的核心,也是全球碳循环和气候变化研究的核心内容,其在碳源与汇的功能调节、减缓温室气体体积分数上升方面具有不可替代的作用,是全球气候变化的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳是全球碳库的重要组成部分,全球土壤有机碳贮量约为 1 500 Pg,是大气碳库的 2 倍,陆地植被碳库的 2~4 倍<sup>[3-7]</sup>。土壤有机碳占到陆地生态系统碳库的 80%<sup>[8-9]</sup>,在全球碳循环中扮演着重要角色<sup>[10-11]</sup>。当前对喀斯特地区土壤有机碳的研究倾向于大尺度土壤有机碳空间分布与储量估算,然而喀斯特土壤有机碳具有高度的空间异质性,同时土壤有机碳受多种因素的影响,人为干扰和自然因素影响程度不同,尤其在土地利用方式上土壤有机碳储量存在很大的不可确定性。喀斯特地区特殊的二元水文结构及复杂的地质地貌条件与土地利用方式,导致土壤有机碳空间分布表现出高度异质性<sup>[13-14]</sup>。研究喀斯特石漠化地区不同土地利用方式下有机碳分布特征,对喀斯特地区土壤有机碳库的精确估算及碳汇管理具有重要意义<sup>[15]</sup>。

贵州省是中国典型喀斯特山区,山地与丘陵面积占总面积的 92.50%。由于喀斯特地区地表崎岖破碎,坡面陡峭,溶蚀、水蚀作用严重、土壤浅薄且不连续,土壤持水能力弱,植物生长缓慢,生态系统抗干扰能力弱、稳定性和自我恢复能力较差<sup>[16-17]</sup>。长期以来,人为干扰造成植被退化、土壤流失、土壤生产力下降,大量基岩裸露,部分区域呈现岩石荒漠化的现象<sup>[18-20]</sup>。目前,石漠化现象仍然严重,年均恶化面积达 744 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。喀斯特石漠化防治过程中土壤环境条件及土地利用处于动态变化之中。尤其是退耕还林、人工种草及人工造林等石漠化防治工程的开展对贵州省土壤有机碳库储量的影响巨大。研究喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征,对预测喀斯特石漠化区土壤有机碳变化趋势及碳汇宏观调控皆具有重要意义。为此,本文通过对贵州省不同用地类型土壤厚度、岩石裸露率、土壤有机碳含量、有机碳密度等基本信息研究,探讨不同用地类型下喀斯特石漠化土壤有机碳分布特征及人为干扰对土壤有机碳的影响。并结合贵州石漠化防治工程规划,以空间代替时间的方式研究贵州石漠化治理对贵州省土壤有机碳库的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

贵州省(103°36′–109°35′ E, 24°37′–29°13′ N)位于云贵高原东部,是全球喀斯特地貌连续分布的集中区域之一。全省国土面积 17.61 万 km<sup>2</sup>,常住人口为 3 529.50 万。全省喀斯特面积约  $13 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占全省国土总面积的 73.6%,全省 95% 的市(县)有喀斯特分布。平均海拔在 1 100 米左右,气候温暖湿润,属亚热带湿润季风气候。年平均温度 18~26 °C,年均降雨量 1 100~1 300 mm。省内主要生态类型包括常绿阔叶林,针叶与落叶阔叶混交林与高山矮灌丛林。上世纪八九十年代,人地矛盾尖锐,经历了开荒垦地时期,生态环境遭到严重破坏。喀斯特石漠化问题仍是制约当地社会发展的重要问题之一。全省石漠化问题较为严重,各市区石漠化情况见图 1<sup>[21]</sup>。

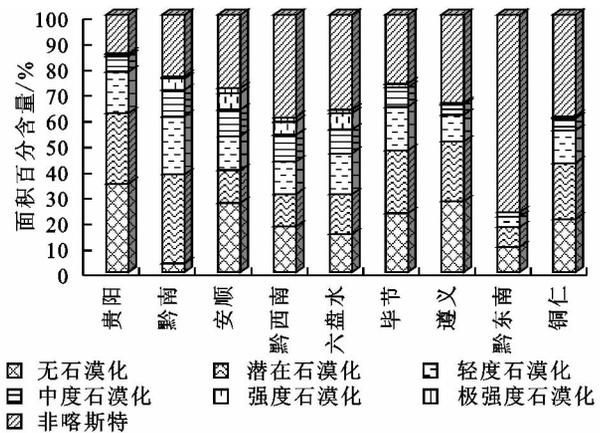


图 1 贵州省各市区石漠化情况

基于植被覆盖及人为干扰强度,本研究将用地类型分为水田、园地(主要为菜地)、旱地(除水田、园地及坡耕地外的农作物生产用地,主要分布于平地或丘陵)、坡耕地(分布于大山各坡位)、弃耕地、荒地(未耕作过,且无乔、灌木分布,仅有少量杂草分布的特殊用地)、草地(长期用于放牧)与林地(乔木林、乔灌木林、灌木林及灌草地)。根据贵州省喀斯特石漠化综合防治工程,治理措施主要涉及退耕还林、人工种草及人工造林,各市区不同措施治理面积见表 1<sup>[21]</sup>。退耕还林是将土壤质量或环境较差的旱地与坡耕地重新规划为林地进行造林,包括坡度较大、岩石裸露率较高、土壤厚度较小等;人工种草与人工造林主要是针对弃耕地与荒地进行种草或造林。在自然生态系统的演

替作用下,绝大部分修复地皆会经历灌草地、灌木林地、乔灌木林地,最终达到乔木林地。为研究石漠化治理对土壤有机碳储量的影响,首先计算了贵州省不同用地类型土壤有机碳的剖面分布特征与各计算深度有机碳密度。分别以灌草地、灌木林地、乔灌木林地及乔木林地土壤有机碳剖面平均值替代旱地与坡耕地及弃耕地与荒地剖面有机碳含量,预测防治工程实施后各演替阶段土壤有机碳密度情况。通过密度差异乘以治理面积估算治理后各演替阶段土壤有机碳增量情况。

表1 贵州省各市区石漠化治理规划面积

地区	单位: km <sup>2</sup>		
	退耕还林	人工种草	人工造林
贵阳	448.94	170.02	233.69
遵义	1393.64	609.57	1137.78
铜仁	892.32	734.26	457.17
六盘水	816.22	200.17	423.32
安顺	1043.33	309.09	384.55
毕节	2629.66	334.69	703.20
黔东南	545.41	128.87	151.32
黔南	2444.87	816.56	814.91
黔西南	1964.12	352.32	783.22
贵州省	12178.51	3655.55	5089.16

## 1.2 样品采集与分析

2014年3月至2015年5月,在研究区域共挖掘土壤剖面2854个,采集土壤样品22786个(图2),每个土壤剖面挖掘深度为1m,分12层(0—5,5—10,10—15,15—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100cm)进行土壤样品采集与土壤容重测定,土壤厚度不足1m时挖掘与采集至实际深度(基岩)。GPS记录样点位置,同时测定坡度。记录植被情况、坡位等信息。土壤样品用自封袋封存运回实验室,于室内自然风干。研磨过2mm筛子去除石砾(计算石砾含量,同时称取5g于105℃烘干计算水分含量),研磨过0.149mm筛子封存用于测定有机碳含量,土壤有机碳用重铬酸钾—硫酸氧化法测定<sup>[22-23]</sup>;土壤容重用环刀法沿土壤剖面自上而下分层测定;土壤厚度用“T”形铁钎测定,长度为60cm和120cm两种;岩石裸露率用样线法测定,样线长度设定为10m。

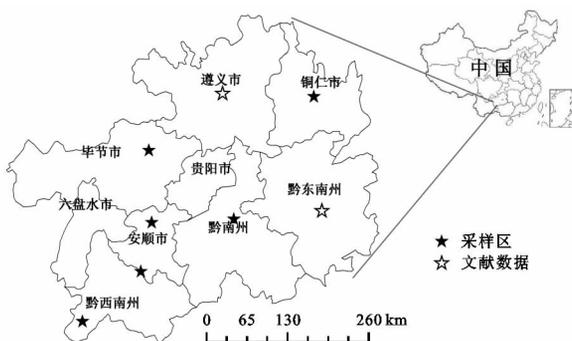


图2 研究区域位置及样点分布

## 1.3 有机碳密度计算

基于实验室分析处理数据,通过方程(1)计算各采样点土壤有机碳密度:

$$\text{土壤有机碳密度 (kg/m}^2\text{)} = \sum_{m=1}^{n+1} C_m \times \text{SBD}_m \times T_m \times (1-\theta_m) \times (1-A_r) \div (1-M_m) \quad (1)$$

式中: $n$ 为该样点土壤样品数(剖面分层数); $C_m$ 为 $m$ 层土壤有机碳含量(g/kg); $\text{SBD}_m$ 为 $m$ 层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $T_m$ 为 $m$ 层土壤厚度(cm); $\theta_m$ 为 $m$ 层石粒含量(%); $A_r$ 为该采样点岩石裸露率(%); $M_m$ 为 $m$ 层土壤样品实验室风干后的含水率(%)。由于测定土壤容重的环刀高5cm,很多样点部分土壤不能作为单独一层进行采样(厚度小于5cm),该情况只记录了土壤厚度,该层( $n+1$ 层)有机碳计算时除土壤厚度外全部采用上一层信息。通过野外调研信息,对研究样点进行用地类型分类,结合实验室分析数据及文献资料<sup>[24-25]</sup>分析贵州省不同用地类型地理信息特征与土壤有机碳空间信息。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式下土壤厚度与岩石裸露率空间异质性

从表2可知,水田与园地土壤厚度最大,平均值分别达到了83.95,74.88cm。其次是草地,土壤厚度平均值为58.05cm。旱地与坡耕地、弃耕地与荒地、乔木林地和乔灌木林地土壤厚度非常类似,平均值为40~45cm。灌木林地与灌草地土壤厚度较小,平均值分别为30.07,31.75cm。从表3可知,水田、园地及旱地与坡耕地岩石裸露率平均值最低,在10.55%以下。其他类型用地岩石裸露率平均值皆在20%以上。其次,水田、园地、旱地与坡耕地岩石裸露率的变异度也是所有用地类型中最低的。说明水田、园地、旱地与坡耕地岩石裸露率分布相对其他用地较为均匀。土壤厚度与岩石裸露率是影响喀斯特地区不同土地利用方式主要潜在因素。土壤厚度大、岩石裸露率低的土地被开垦用作农用地。而土壤厚度小、岩石裸露率高的土地则开垦较少,或被闲置、丢弃。在自然演替作用下,有的演替为自然草地或各种林地,有的则因为环境过于恶劣而不断退化、水土流失加剧、石漠化加重。

### 2.2 不同土地利用方式下土壤有机碳垂直分布特征

不同利用方式下土壤有机碳含量存在明显差异(表4)。土壤有机碳的整体剖面特征表现为,随土壤深度的增加而逐渐降低,同一用地类型的不同土壤层之间,以及同一土壤层的不同用地类型之间土壤有机碳含量平均值皆存在差异。同时可以看出,不同用地类型土壤有机碳含量差异主要存在于表层60cm。在60cm以下,不同用地类型土壤有机碳含量间差异较小。总体上,土壤有机碳含量为灌木林地>乔灌木林地>灌草地>乔木林地>弃耕地与荒地>草地>水田>园地>旱地与坡耕地。

表 2 不同用地类型土壤厚度情况

利用类型	最小值/ cm	最大值/ cm	平均值/ cm	变异度	偏度 系数	峰度 系数
水田	16.00	>100.00	83.95	556.90	-1.24	0.22
园地	17.00	>100.00	74.88	652.02	-0.65	-0.71
旱地与坡耕地	6.00	>100.00	43.92	927.91	0.85	-0.44
弃耕地与荒地	6.00	>100.00	43.92	782.43	0.85	-0.44
乔木林地	5.00	>100.00	44.11	830.76	0.82	-0.54
乔灌木林地	7.00	>100.00	40.21	925.05	1.16	-0.02
灌木林地	5.00	>100.00	31.75	438.57	1.57	2.55
灌草地	7.00	>100.00	30.07	287.56	1.21	2.83
草地	7.00	>100.00	58.05	956.69	0.20	-1.40

表 3 不同用地类型岩石裸露率情况

利用类型	最小值/ %	最大值/ %	平均值/ %	变异度	偏度 系数	峰度 系数
水田	0.00	31.20	2.10	91.71	5.13	27.12
园地	0.00	67.00	8.91	307.90	1.76	2.01
旱地与坡耕地	0.00	91.00	10.55	341.83	1.85	2.73
弃耕地与荒地	0.00	95.00	36.44	511.94	0.54	-0.65
乔木林地	0.00	83.00	30.43	700.41	0.32	-1.24
乔灌木林地	0.00	85.00	28.05	882.11	0.74	-0.78
灌木林地	0.00	90.00	27.54	458.70	0.93	0.30
灌草地	0.00	91.00	35.30	506.73	0.31	-0.43
草地	0.00	92.00	22.04	602.65	1.00	-0.05

表 4 不同用地类型土壤有机碳剖面特征

土层深度/cm	水田	园地	旱地与坡耕地	乔木林地	乔灌木林地	灌木林地	灌草地	草地	弃耕地与荒地
0-5	25.07±0.40gAB	23.69±1.39hA	23.24±0.27Ak	39.42±1.37Dh	44.17±2.80Ee	47.41±1.48Eg	43.67±2.12Ee	29.91±1.28Bh	35.97±0.82Cj
5-10	23.33±0.38fgAB	20.49±1.25gA	20.69±0.24Aj	33.51±1.19Dg	38.44±2.61Ee	40.44±1.23Ef	38.32±2.10Ed	25.47±1.13Bg	30.39±0.72Ci
10-15	21.06±0.40fAB	17.47±1.31fA	18.30±0.24Ai	29.27±1.11Df	32.10±2.67DEd	36.94±1.35Fe	34.00±1.99EFcd	21.64±1.04Bf	26.84±0.70Ch
15-20	17.45±0.39eAB	15.45±1.24eA	15.44±0.24Ah	25.73±1.09De	30.19±2.72Ed	32.08±1.36Ed	29.92±1.91Ebe	18.98±0.98Be	23.33±0.62Cg
20-30	12.58±0.35bA	12.19±1.08dA	12.55±0.23Ag	21.23±1.07Dd	22.54±2.20DEc	25.23±1.36Ec	25.46±1.96Eb	17.07±1.02Bd	19.34±0.61Cf
30-40	9.28±0.28cA	10.40±0.87cA	9.99±0.20Af	14.84±0.91BCe	14.30±1.92BCb	19.24±1.24Dbc	17.48±1.09CDa	13.94±0.98Bc	15.23±0.62BCe
40-50	7.71±0.24cA	8.38±0.68bA	8.59±0.20Ae	12.17±0.96Bbc	8.42±0.98Aa	17.38±1.82Cbc	16.06±1.59Ca	11.14±0.82Bbc	12.38±0.57Bde
50-60	6.87±0.24bA	7.79±0.66bA	7.50±0.19Ad	9.76±1.03Bab	7.72±1.38ABa	14.83±2.28Cb	10.25±1.57BCa	8.98±0.71Bab	9.84±0.61Bed
60-70	6.50±0.23bA	7.13±0.67bA	6.79±0.18Ad	8.85±1.00Bab	5.73±1.03Aa	9.44±2.35Bab	11.36±4.40Ba	8.15±0.68ABab	7.96±0.43ABbc
70-80	6.02±0.24abA	7.61±1.32abAB	6.25±0.18 A bc	7.96±0.95Bab	5.30±1.05Aa	5.69±0.91Aa	6.27(n=1)	7.07±0.72ABa	7.12±0.40ABab
80-90	5.78±0.29aA	6.40±0.57aAB	5.59±0.16Aab	8.09±1.04Bab	6.16±1.38ABa	4.96±1.03Aa	5.68(n=1)	6.85±0.75ABa	6.39±0.43ABab
90-100	5.17±0.27aA	5.71±0.59aA	5.24±0.18Aa	6.61±0.91Aa	6.22±1.53Aa	4.92±1.00Aa	5.98(n=1)	6.22±0.77Aa	5.63±0.41Aa

注:同一行内相同大写字母表明不同用地类型土壤有机碳含量在该层差异不显著( $P<0.05$ );同一列内相同小写字母表示该用地类型不同土层间土壤有机碳含量差异不显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同土地利用方式下土壤有机碳分布

喀斯特山区,影响土壤有机碳密度的主要因素为土壤厚度与基岩裸露率。表层 10 cm,不同用地类型土壤有机碳密度为灌木林地>乔木林地>水田>灌草地>乔灌木林地>弃耕地与荒地>旱地与坡耕地>草地>园地;表层 20 cm 为水田>灌木林地>乔木林地>乔灌木林地>弃耕地与荒地>灌草地>旱地与坡耕地>草地>园地;30 cm 为水田>乔木林地>灌木林地>乔灌木林地>弃耕地与荒地>旱地与坡耕地>草地>灌草地>园地;100 cm 为水田>园地>旱地与坡耕地>草地>乔木林地>弃耕地与荒地>灌木林地>乔灌木林地>灌草地(表 5)。随着计算深度的增加,不同用地类

型土壤有机碳密度顺序不断变化,主要是受不同用地类型土壤厚度的影响。如灌木林地,在同一土壤层其土壤有机碳含量相对较高,但大部分灌木林地土壤厚度较浅。表层 10 cm 其土壤有机碳密度在所研究用地类型中排第一,当统计深度大于 20 cm 时,其土壤有机碳密度则逐渐地低于水田、旱地与坡耕地、草地、乔木林地、园地及弃耕地与荒地。水田、园地、旱地与坡耕地则相反,虽然单层土壤有机碳浓度在所研究用地类型中相对较低,但土壤厚度相对较大,随着统计厚度增加,其土壤有机碳密度优势逐步得以体现。水田、园地、旱地与坡耕地人为干扰强度相对其他用地较大,说明人类生产活动会降低土壤有机碳含量。

表 5 不同土地利用方式下土壤有机碳密度

利用类型	0-10 cm 土层	0-20 cm 土层	0-30 cm 土层	0-100 cm 土层
水田	2.72±0.04cd	5.18±0.09bc	6.84±0.13c	11.83±0.27d
园地	2.06±0.09a	3.71±0.18a	4.87±0.24a	9.07±0.64a
旱地与坡耕地	2.16±0.03a	3.95±0.05a	5.22±0.07a	8.99±0.15d
弃耕地与荒地	2.42±0.06b	4.21±0.10a	5.33±0.14a	7.12±0.21b
乔木林地	2.74±0.12cd	4.74±0.22b	5.96±0.27b	7.91±0.37bc
乔灌木林地	2.46±0.16bc	4.31±0.31ab	5.39±0.41ab	6.75±0.53ab
灌木林地	2.90±0.11d	4.80±0.18b	5.78±2.4ab	6.87±0.34ab
灌草地	2.48±0.15bc	4.09±0.26a	5.04±0.35a	5.89±0.47a
草地	2.17±0.09a	3.85±0.17a	5.08±0.23a	8.07±0.42c

注:同一列内相同小写字母表示不同用地类型间土壤有机碳密度差异不显著( $P<0.05$ )。

## 2.4 石漠化防治与土壤有机碳密度及有机碳储量变化

贵州省属亚热带湿润季风气候,气候温暖湿润,利于植被生长与恢复。工程实施后,人为干扰得到控制、管理加强。在自然生态系统的演替作用下,治理区域将在短时间(2~3 a)内转变为灌草地。然后将经历灌木林地、乔灌木林地及乔木林地。

分别用灌草地、灌木林地、乔灌木林地及乔木林地土壤有机碳剖面平均值代替本研究中的旱地与坡耕地及弃耕地与荒地样点有机碳剖面含量,探究石漠化防

治工程实施后土壤有机碳密度的变化。通过密度差与治理面积的乘积估算了工程实施后各演替阶段土壤有机碳密度及有机碳增量。治理工程实施后土壤有机碳密度与增量皆呈现先增大后减小的现象。当治理区域在自然演替作用下进入乔木林阶段后,在0-10,0-20,0-30,0-100 cm深度贵州省土壤有机碳增量将分别达到 $1.99 \times 10^{13}$ ,  $3.37 \times 10^{13}$ ,  $4.45 \times 10^{13}$ ,  $6.29 \times 10^{13}$  g(图3)。石漠化防治工程实施后贵州省土壤有机碳含量与密度皆会增加。

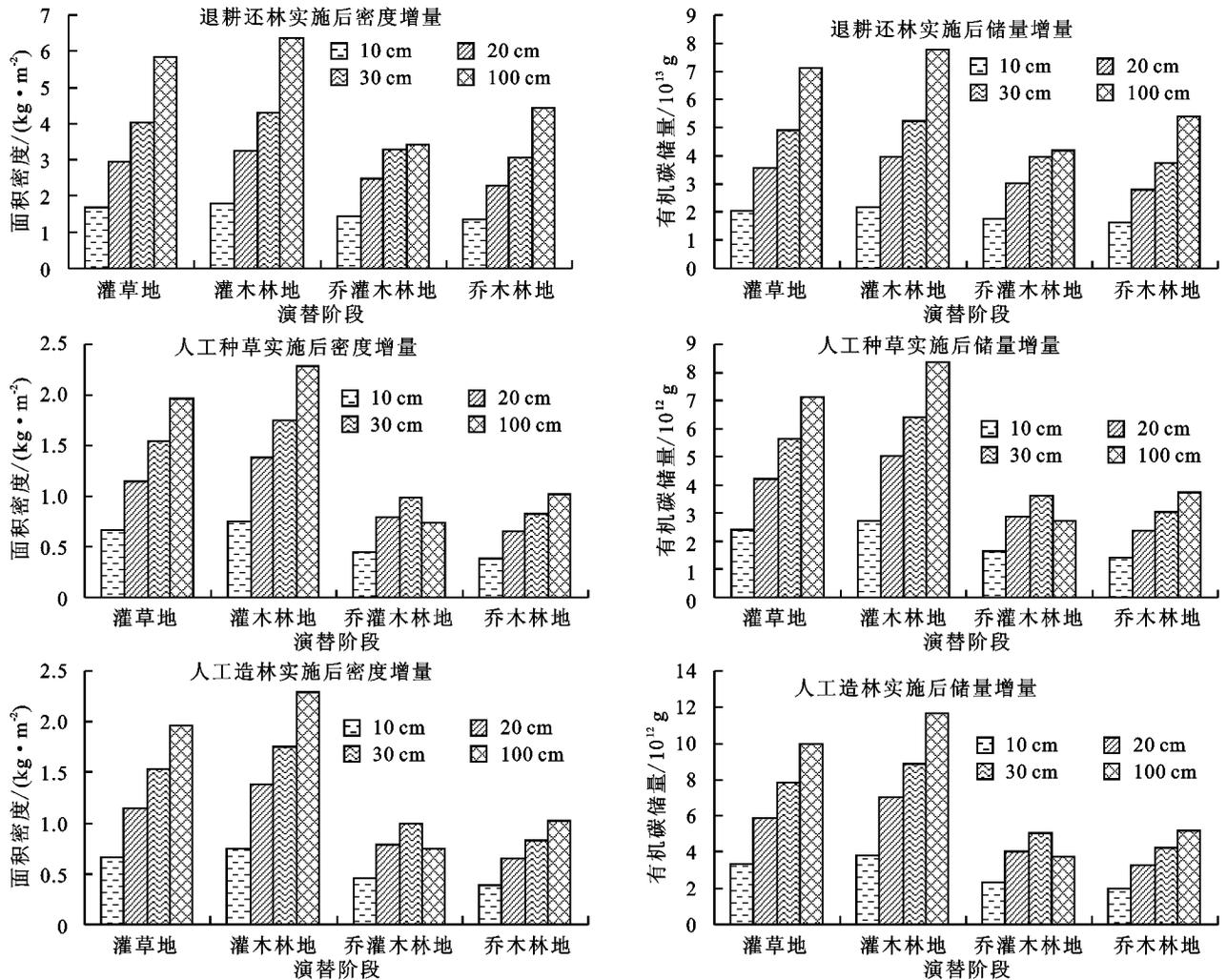


图3 石漠化工程治理后各演替阶段土壤有机碳密度与储量增量

## 3 讨论

### 3.1 喀斯特石漠化地区与其他地区土壤有机碳含量的差异

特殊的地质条件和自然地理背景造就了贵州喀斯特地区相对脆弱的生态环境,不合理的土地利用方式导致植被破坏、土壤侵蚀、质量退化,形成大面积的石漠化景观。喀斯特地区复杂的地形地貌特点都不同于非喀斯特地区,导致喀斯特土壤有机碳表现出高度的空间异质性,最终形成土壤有机碳储量的估算也有许多不确定的因素<sup>[26]</sup>。喀斯特地区大量基岩裸露,其土壤平均深度仅为4~9 cm,本研究中表层土壤(0-20 cm)有机碳含量为1.61~119.11 g/kg(表

6),土壤有机碳含量平均值为25.07 g/kg,与非喀斯特地区的三江平原相近,高于黄土高原地区、黄花甸子、新疆三河<sup>[24,27-33]</sup>。土壤中的有机碳主要源于进入土壤的动植物残体与植物根系分泌物,在土壤微生物作用下分解与植物对部分有机物的吸收丢失。其含量的大小受气候、植被、土壤属性以及农业经营实践等多种物理因素、生物因素和人为干扰因素的控制,并存在各种因子之间的相互作用<sup>[26]</sup>。贵州气候适宜,雨水充沛,有利于植物生长,外源输入量较大。同时,由于特殊地质条件与地理环境,贵州土壤富含的二价钙镁元素离子与土壤有机质结合后,增加了土壤有机质的生物降解抗性。导致贵州土壤有机碳含量

高于黄土高原地区、黄花甸子、新疆三工河土壤有机碳含量,同时黄土高原与新疆地区的地质景观破碎,植被稀少,土壤贫瘠,加上长期严重的水土流失,致使土壤有机碳大量流失,故该区域有机碳含量较低。

在喀斯特地区土壤总量和有机碳密度都非常低,与前人在中国南方喀斯特其他石漠化地区研究结果一致。本研究中 1 m 土壤有机碳密度( $8.68 \text{ kg/m}^2$ )远小于全国平均水平( $10.53 \text{ kg/m}^2$ )<sup>[34]</sup>。喀斯特地区受地表微形态

和微地貌空间变异的影响,土壤分布及其性质在水平方向上表现出明显的空间异质性,明显小于其他生态系统土壤有机碳的密度。本研究区 69.67% 的样点土壤有机碳密度低于全国平均水平( $10.53 \text{ kg/m}^2$ )。喀斯特地区岩石裸露率高,土被不连续,石砾含量,造成剖面土壤有机碳密度较小,即单位面积土壤有机碳储量少。与张等的研究结论一致,显示了喀斯特石漠化生态系统土壤贫瘠,也印证了喀斯特生态系统的脆弱性<sup>[35]</sup>。

表 6 喀斯特小流域表层土壤碳含量及密度与其他地区比较

不同研究区域	有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$		有机碳密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	
	含量范围	平均值	含量范围	平均值
黄土高原地区(非喀斯特)	1.28~24.55	16.98	1.39~33.41	10.92
东北三江平原(非喀斯特)	1.36~63.21	24.20	1.26~6.76	9.72
新疆三工河(非喀斯特)	0.58~21.78	7.17	3.16~25.70	18.39
云南纳板河(喀斯特)	12.59~55.63	—	—	—
本研究(喀斯特)	1.61~119.11	25.07	0.33~19.54	4.27

注“—”表示无参考数据。

### 3.2 喀斯特石漠化地区有机碳分布及其影响因素

喀斯特地形地貌特征复杂,土地利用管理相对多样化,潜在影响因素较多。植被空间分布多样化,导致土壤空间异质性高,从而土壤营养物质包括有机碳空间异质性也较高。土地利用管理多元化更增加土壤营养物质的空间异质性。不同利用类型下土壤有机碳浓度与密度在空间上皆存在较大差异。本研究中不同土地利用方式下表层土壤有机碳含量(0—5 cm)为  $1.04 \sim 128.18 \text{ g/kg}$ ,表层土壤有机碳密度(0—5 cm)为  $0.06 \sim 5.03 \text{ kg/m}^2$ ,有机碳含量最大值是最小值的 128 倍,有机碳密度的最大值是最小值的 5 倍,表明喀斯特脆弱生态系统的退化是以强烈的人类干扰下植被大量减少,最终相差土地生产力退化而类似荒漠化复杂生态系统。究其原因在于,长期以来,人为活动干扰下,不同利用类型土地有机碳输入总量及质量皆存在较大差异<sup>[29]</sup>。对于农作物生产的耕地而言,绝大部分生物质(如作物秸秆)会在农民收获粮食后带走用于喂养牲口,或田间烧掉,仅部分耐高温元素会归还土壤。而大部分林地与草地更新死亡的生物质会滞留原地,在微生物的降解作用下重新进入土壤。

由人类活动引起的土地利用/覆盖变化是土壤碳库和碳循环最直接的影响因子,不同用地类型下植被存在较大差异,由于根系活动强度与空间不同,植被根系活动引起的有机碳量也存在较大差异,如死亡根系、根系分泌物等。不同用地类型土壤有机碳消耗也存在一定差异。对农作物地,农民会施加氮、磷、钾等营养元素,加快农作物生长,农作物对土壤部分种类有机质的吸收大大加快。同时,农作物根系活动加强,对根际土壤环境具有一定的改善作用,从而为土壤微生物活动提供较好的环境,加速了土壤微生物对土壤有机质的降解。草地植物根系虽然密集,但草地

土壤透气、透水性能较差,草类根系呼吸活动较弱,对根际土壤环境的改善较作物根系弱。故草地虽然大部分更新死亡的生物质会暂时滞留原地,但向土壤渗透速度较慢,部分生物质同样会随地表径流流失。灌草地、灌木林地与乔灌木林地,灌木与乔木能较好地保护更新死亡生物质不被地表径流带走(特别是坡地),形成腐殖质层,为微生物活动与繁殖提供较好场所。且灌草地、灌木林地与乔灌木林地土壤较草地疏松,有利于溶解性有机质向土壤输入。

## 4 结论

(1)喀斯特地区表层(0—20 cm)土壤有机碳含量较非喀斯特地区高,但土壤有机碳密度则远小于非喀斯特地区,适宜的气候条件与特殊的地质环境是土壤有机碳含量高的主要原因;人为干扰是影响贵州省土壤有机碳含量的重要因素,农业生产活动使得土壤有机碳含量降低。贵州省不同利用方式土壤有机碳含量大小顺序为:林地(灌草地、灌木林地、乔灌木林地及乔木林地) $>$ 弃耕地与荒地 $>$ 草地 $>$ 耕地(水田、园地及早地与坡耕地)。

(2)土壤厚度与岩石裸露率是影响贵州省土地利用的主要潜在因素,同时也是导致贵州省土壤有机碳密度与储量偏小的主要原因。

(3)基于本研究数据,随着贵州省石漠化防治工程的推进,在自然生态系统的演替作用下,贵州省喀斯特生态系统将得到较好改善。因贵州省石漠化控制得以固定的碳增量将达到  $6.29 \times 10^{13} \text{ g}$ (表层 1 m)。

### 参考文献:

- [1] Jones C, Mc Connell C, Coleman K, et al. Global climate change and soil carbon stocks, predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil[J].

- Global Change Biology, 2005, 11(1):154-166.
- [2] 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.
- [3] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool [J]. Carbon Management, 2014, 5(1):81-91.
- [4] 黄耀, 孙文娟, 张稳, 等. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展 [J]. 中国科学(生命科学), 2010, 40(7):577-586.
- [5] Weisert L F, Salmond J A, Schwendenmann L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO<sub>2</sub> efflux across urban land use and soil cover types [J]. Geoderma, 2016, 271(6):80-90.
- [6] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(1):84-89.
- [7] 杨顺华, 张海涛, 陈家赢, 等. 平原丘陵过渡带土壤有机碳空间分布及环境影响 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(12):3728-3736.
- [8] 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(3):466-473.
- [9] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):143-155.
- [10] 郭治兴, 袁宇志, 郭颖, 等. 基于地形因子的土壤有机碳最优估算模型 [J]. 土壤学报, 2017, 54(2):1-12.
- [11] Hobley E U, Baldock J, Wilson B. Environmental and human influences on organic carbon fractions down the soil profile [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 223(3):152-166.
- [12] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性 [J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1055-1062.
- [13] 田丽艳, 郎赞超, 刘丛强, 等. 贵州普定喀斯特坡地土壤剖面有机碳及其同位素组成 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(9):2362-2367.
- [14] 张殿发, 王世杰, 周德全, 等. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(4):1-5.
- [15] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响 [J]. 土壤学报, 2006, 43(1):26-32.
- [16] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(6):657-666.
- [17] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究 [J]. 土壤学报, 2005, 42(3):419-427.
- [18] You H Y. Orienting rocky desertification towards sustainable land use: An advanced remote sensing tool to guide the conservation policy [J]. Land Use Policy, 2017, 61(2):171-184.
- [19] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题 [J]. 中国岩溶, 2010, 29(3):274-279.
- [20] 李建存, 涂杰楠, 童立强, 等. 贵州岩溶石漠化 20 年演变特征与影响因素分析 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4):133-137.
- [21] 熊康宁, 袁家榆, 方尹. 贵州省喀斯特石漠化防治综合防治图集(2006—2050) [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2007.
- [22] Wang Y G, Li Y, Ye X H, et al. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(8):1925-1931.
- [23] Nelson D W, Sommers L E, Sparks D L, et al. Total carbon, organic carbon, and organic matter [J]. Methods of Soil Analysis Part-chemical Methods, 1982:961-1010.
- [24] 王丽丽, 宋长春, 葛瑞娟, 等. 三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量研究 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(6):656-660.
- [25] 惠辽辽, 邵景安, 慈恩, 等. 近 30 年贵州遵义县农田土壤有机碳动态及影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(4):653-665.
- [26] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] Mao D H, Wang Z, Li L. Soil organic carbon in the Sanjiang Plain of China: Storage, distribution and controlling factors [J]. Biogeosciences Discussions, 2015, 11(10):1635-1645.
- [28] 薛志婧, 侯晓瑞, 程曼, 等. 黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(3):160-163, 168.
- [29] 李龙, 吴丽芝, 姚云峰, 等. 小流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究: 以内蒙古赤峰市黄花甸子流域为例 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(5):18-23.
- [30] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦, 等. 三工河流域绿洲土壤有机碳的空间分布 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(1):101-107.
- [31] 郭芳芳, 李永梅, 李朝丽, 等. 纳板河流域土地利用变化对土壤有机碳及微生物生物量碳和氮的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(10):2473-2478.
- [32] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4):384-393.
- [33] 薛志婧, 马露莎, 安韶山, 等. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量 [J]. 生态学报, 2015, (9):2917-2925.
- [34] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. 地理学报, 2000, (5):533-544.
- [35] 张珍明, 周运超, 黄先飞, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳密度及碳储量空间分布异质性 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):184-190, 214.