

植被恢复对岩溶石漠化区土壤有机碳及轻组有机碳的影响

李衍青^{1,2}, 蒋忠诚¹, 罗为群¹, 邓艳¹, 蓝芙宁¹, 覃星铭¹

[1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074]

摘要: [目的] 通过分析石漠化治理区不同植被恢复年限对土壤有机碳(SOC)及其组分影响, 为该地区石漠化的治理提供一定的基础数据。[方法] 以重度石漠化土地作为对照, 运用空间代替时间的方法, 研究了广西壮族自治区平果县果化岩溶石漠化区植被恢复 5, 10, 15, 20 a 后土壤(0—30 cm)SOC 和土壤轻组有机碳(LFOC)的变化。[结果] 石漠化土地在进行植被恢复后, SOC 和 LFOC 含量明显增加; 植被恢复使表层 0—10 cm 的 SOC 和 LFOC 储量明显增加, 且随着恢复时间的增长逐渐变大, 同时植被恢复对表层(0—10 cm)SOC 和 LFOC 储量的影响要远高于下层(20—30 cm); 植被恢复后 LFOC 储量的增幅远高于 SOC 储量。[结论] 在石漠化区进行植被自然恢复可以有效防止土地石漠化, 增加碳的流通。

关键词: 植被恢复; 土壤有机碳; 轻组有机碳; 岩溶石漠化区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0158-06

中图分类号: S152.7

文献参数: 李衍青, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 植被恢复对岩溶石漠化区土壤有机碳及轻组有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 158-163. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.029

Effects of Revegetation on Soil Organic Carbon and Light-fraction Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region

LI Yanqing^{1,2}, JIANG Zhongcheng¹, LUO Weiqun¹, DENG Yan¹, LAN Funing¹, QIN Xingming¹

[1. Karst Institute of Geology, CAGS, Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: [Objective] The effects of revegetation on soil carbon(SOC), light-fraction organic carbon(LFOC) was analyzed to provide background data for rocky desertification restoration. [Methods] Sites with severe rocky desertification land was taken as contrast and using space as a substitute for time, SOC and LFOC in sites with 5, 10, 15, 20-year restoration in Guohua karst rocky desertification area of Pingguo County, Guangxi Zhuang Autonomous Region were measured and their changes along revegetation were illustrated. [Results] SOC and LFOC contents increased obviously after revegetation, especially in 0—10 cm soil layer. The increment of surface soil LFOC storage was much higher than that of SOC storage, suggesting that vegetation restoration on rocky desertification land had a large effect on LFOC. [Conclusion] Vegetation restoration can prevent land rocky desertification and increase carbon circulation.

Keywords: vegetation restoration; SOC; LFOC; karst rocky desertification region

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统重要的碳库和营养元素库, 不仅影响植物的生产力, 同时有机碳与大气 CO₂ 的转化影响大气中 CO₂ 的浓度, 与气候变化直接相关。在全球变暖的

趋势下, 人们希望土壤能够固定更多的大气 CO₂, 土壤碳库因储量巨大, 其微小的变化就可能影响全球的碳平衡, 其已经被作为缓解大气 CO₂ 浓度升高的沉积库^[1]。随着对土壤碳循环过程的深入研究, 如何恢

收稿日期: 2015-07-06

修回日期: 2015-10-24

资助项目: 国家科技支撑计划项目“喀斯特峰丛洼地水土调蓄技术研究”(2011BAC09B02); 中国地质科学院岩溶地质研究所所控项目(2011005); 国家自然科学基金项目(41502342; 41471447); 广西自然科学基金项目(2015jjBA50049); 中央级公益性科研专项(YWF201401)

第一作者: 李衍青(1982—), 男(汉族), 山东省高密市人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事岩溶石漠化治理及水土流失研究。E-mail: lyq@karst.ac.cn。

通讯作者: 蓝芙宁(1977—), 男(瑶族), 广西壮族自治区都安县人, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶石漠化方面的研究。E-mail: lanfuning@karst.ac.cn。

复退化生态系统土壤固碳潜力成为关注的热点。目前,通过利用土壤有机碳不同组分的变化来探讨土壤碳库变化的研究日益增多^[2]。根据 SOC 密度大小,可将其分为轻组(light fraction, LF)和重组(heavy fraction, HF)两大组分^[3]。其中,轻组常指土壤有机碳中密度低于 $1.6\sim 2.0\text{ g/cm}^3$ 的部分,由未完全分解的动植物残体和微生物残骸等组成,具有易分解、周转快等特点^[4]。与 SOC 相比,轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)能更迅速指示土壤质量的变化,其对生态系统的变化更为敏感^[5],因此可作为土壤潜在生产力和土壤管理措施引起的土壤有机碳库变化的早期指标^[6]。

西南裸露型岩溶区是全球 3 大碳酸盐岩连续分布区之一,土地的石漠化是西南岩溶区最严重的土地退化问题^[7-8]。截止 2011 年,中国石漠化土地仍占岩溶区土地面积的 26.5%^[9]。土地石漠化使地表持水保土能力下降,引起土壤碳的流失以及土壤粗化和贫瘠^[10]。为治理土地石漠化,自 20 世纪 90 年代以来广西平果果化开展了封山育林,进行植被恢复^[11],局部地区呈现了石漠化逆转的现象。植被恢复一方面增加了石漠化区土壤有机碳储量,提高了土壤生产潜力^[12]。另一方面,石漠化的逆转增加了地表覆盖度,改变了土地微气候和土壤环境,进而影响 SOC 的分布,特别是对表层土壤 LFOC 的影响,对该区土壤碳库平衡以及应对气候的变化均具有重要意义。在岩溶区,尽管对不同土地利用方式、不同植被恢复模式下、不同石漠化程度下土壤有机碳变化^[13-15]的研究较多,但是对能够迅速指示土壤质量变化的轻组有机碳的研究比较匮乏,同时从不同植被恢复年限下对土壤有机碳的研究也较少。鉴于此,本研究以国土资源部岩溶石漠化基地为依托,选择不同植被恢复年限的石漠化土地为研究对象,采用土壤密度分组的方法,通过测定土壤总有机碳、易变有机碳(主要为轻组有机碳)分析不同植被恢复年限对 SOC 及其组分空间分布的影响,以及石漠化地区 SOC 和 LFOC 对植被的响应,以期为该地区石漠化的治理提供一定的基础资料。研究结果不仅可以丰富我国陆地生态系统碳收支研究体系的内容,还可为评价我国在应对全球气候变化中所作的贡献提供基础性数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西平果县果化镇龙何屯,地理坐标为北纬 $23^{\circ}22'30''\sim 23^{\circ}24'32''$,东经 $107^{\circ}22'30''\sim$

$107^{\circ}24'47''$ 。该区域属于典型的岩溶峰丛洼地地貌。气候属亚热带季风气候,热量丰富,雨量充沛。年平均气温为 $20.2\sim 22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年无霜期 330 d 左右,多年平均降雨量 $1\,322.3\text{ mm}$,日平均湿度为 72.06%。降水年内分布极不均,5—9 月为丰水期,占全年的 65%,最大的日降雨量可达 112 mm,12 月至次年 3 月为枯水期,4,10,11 月为平水期。地层主要有石炭系上统(C_3)和二叠系下统栖霞阶(P_1q),局部出露有二叠系上统(P_2)和三叠系下统(T_1),岩石主要为纯石灰岩和硅质灰岩,东南角有少量泥质成分。岩溶发育强烈,地表漏水严重,大气降水快速转换成地下水,除雨后坡面产流外,缺乏常年流水的完整地表水文系统,除雨季涝时洼地淹水外,无固定地表水域。岩溶发育厚度大多为 1~3 m,局部 4.5~7 m,表层溶沟、溶槽、浅部溶隙、溶孔、溶穴、溶痕及石芽等发育。洼地发育较多落水洞、竖井、天窗,饱水带多发育岩溶管道、岩溶裂隙。

1.2 试验设计

取样点为植被恢复样地,分为恢复 5,10,15 和 20 a,以及作为对照的重度石漠化地。这类样地的选择是以空间代替时间的方法考虑(选择了基岩岩性、土壤厚度、土壤类型基本一致的地点)。作为对照的样地,石漠化程度在 70%以上,重度石漠化地原来零星的栽种任豆树(*Zenia insignis*),目前已经砍伐,有土壤的地方依然在进行耕种,种植火龙果(*Hylocereus undatus*)、花生(*Arachis hypogaea*)等。5 a 恢复地原来为耕地,种植玉米(*Zea mays*),目前已经弃耕,上有部分杂草和小灌木,植被高度约有 30~40 cm;10 a 取样点原为龙何屯后山耕地,已弃耕 10 a,目前主要为灌草,灌木高度约为 1 m;15 a 样地上植被以乔灌为主,其中灌丛高度约为 1~1.5 m,并有高大乔木。20 a 以上恢复样地植被以乔木为主,植被覆盖率高,约为 90%以上,样地的基本情况详见表 1。

1.3 取样及测定

2012 年 10 月,在各类不同的样点分别挖土壤剖面,分 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 取样,每种类型采用三点混合取样。用小铁铲在对应的样点和土层取样,带回实验室过 2 mm 土筛并风干。一部分样品供粒级分析和轻组分离,另一部分样品进一步磨细,用于有机碳含量测定。

土壤颗粒分析采用比重计法,土壤轻组分离采用 Janzen 等^[16]的方法并做了适当的改进:用 1.70 g/cm^3 的 NaI 溶液浸提,搅拌震荡数秒后,用 NaI 溶液将附着在管壁和玻璃棒上的颗粒洗入悬浮液中,静置

30 min放置离心机进行离心(825 r/min),利用玻璃滤纸对悬浮液进行真空过滤,并用去离子水洗去剩余的NaI溶液。将浮在滤纸上的物质放65℃烘箱中烘

干12 h,烘干后称重,获得轻组物质干质量。土壤有机碳和轻组物质中碳含量采用重铬酸钾氧化—外加热法进行测定。

表1 试验样地基本情况

样地	土层厚度/cm	土壤类型	坡位	主要植被类型及盖度	土地利用历史
重度石漠化	30	棕色石灰土	中坡位	火龙果,植被盖度<10%	原来植被为任豆,砍伐后开始栽种火龙果2~3 a
恢复5 a	30	棕色石灰土	下坡位	黄荆,植被覆盖度约35%	原来为耕地,种植玉米,弃耕约5 a
恢复10 a	30	棕色石灰土	中上坡位	黄荆、五节芒,植被覆盖度约55%	原为耕地,弃耕10 a左右
恢复15 a	40	棕色石灰土	中下坡位	黄荆、任豆,植被覆盖度75%	原为耕地,后弃耕,并种植任豆树
恢复20 a以上	30	黑色石灰土	上坡位	阴香、羊蹄甲,植被覆盖度>90%	植被较好的林地、原有砍伐行为、近20 a人畜罕至

根据各层土壤有机碳和轻组有机碳含量及容重计算其储量(kg/m^2):

$$\text{SOC 储量} = (C_1 \cdot \rho \cdot h) / 100 \quad (1)$$

$$\text{LFOC 储量} = (L_F \cdot C_2 \cdot \rho \cdot h) / 10\,000 \quad (2)$$

式中: ρ ——土壤容重(g/cm^3); h ——土层厚度(cm); C_1 ——土壤有机碳含量(g/kg); C_2 ——轻组有机碳含量(g/kg); L_F ——土壤样品中轻组物质的质量百分比(%)。

采用Excel和Origin 8.5软件对数据进行处理及图件绘制。

2 结果与分析

2.1 植被恢复后土壤有机碳和轻组有机碳的变化

石漠化土地通过自然恢复后,其SOC含量明显增加,且随着恢复时间的增长SOC含量首先有一个降低的过程然后开始不断增加(图1)。植被恢复5,10,15,20 a后,SOC的平均含量分别为重度石漠化的0.78,1.42,1.90,2.24倍。土壤有机碳在0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm不同层次上,表现出一致的

趋势,都是随着恢复年限的增加先减小然后逐渐增大,尤其是表层0—5 cm,这种变化的趋势最明显。在表层0—5 cm随着恢复时间的增加,其SOC含量的增加最明显,自然恢复20 a的土地其SOC为重度石漠化区的3.26倍,而在土壤较深层次20—30 cm上,这种变化趋势不明显。在不同植被恢复时间的土地上,土壤SOC含量都是随着深度的增加逐渐变小,表层0—5 cm土壤平均SOC含量为72.38 g/kg,为最低层20—30 cm土壤平均SOC含量的2.06倍。

土壤LFOC随着植被恢复年限的增加而逐渐增大,作为对照的重度石漠化地,其LFOC含量平均值为151.8 g/kg,而经过5,10,15,20 a植被恢复后,其LFOC含量为167.5,238.3,267.7,318.6 g/kg,分别为重度石漠化土地的1.10,1.57,1.76,2.10倍。而在0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—30 cm土壤层次上LFOC含量的平均值分别为250.19,220.95,231.11,216.25 g/kg,表层的LFOC要明显的高于其他层次,总体而言,随着土壤层次的加深,其LFOC含量是减小的。

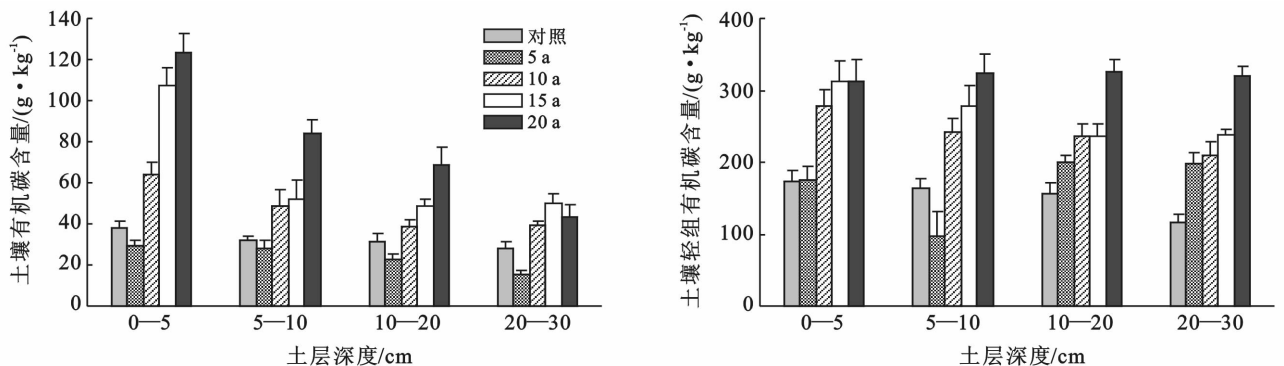


图1 重度石漠化区植被恢复后土壤有机碳及轻组有机碳含量变化

2.2 植被恢复后土壤有机碳和轻组有机碳储量的变化

图2为作为对照的重度石漠化区0—30 cm土层中,SOC储量为 11.92 kg/m^2 ,而经过植被恢复10,15,20 a后,SOC储量为重度石漠化区的1.28,1.66,1.96倍。恢复时间越长,SOC储越高。不同恢复年限样地中表层0—10 cm SOC储量分别占0—30 cm土层的34.84%,42.53%,43.65%,42.62%和45.98%,说明重度石漠化区植被恢复对表层的SOC影响更为明显。植被恢复显著增加了土壤LFOC储

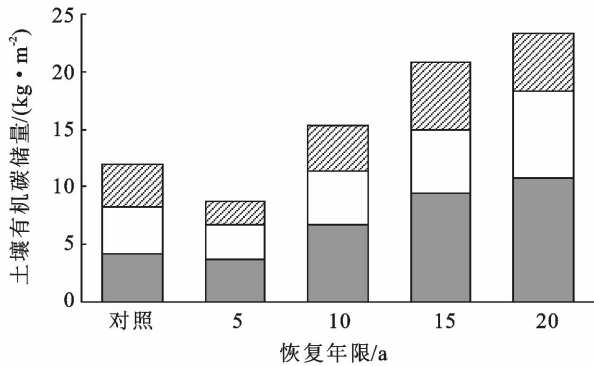
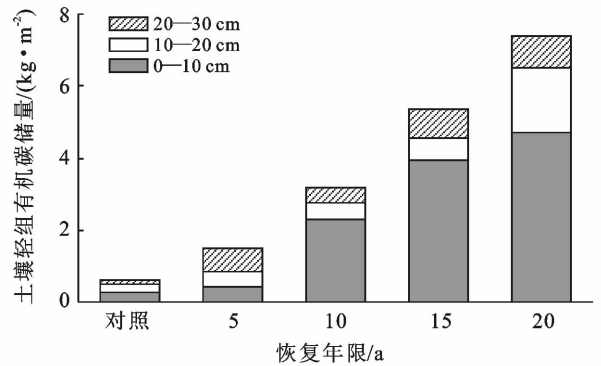


图2 植被恢复后土壤有机碳和轻组有机碳储量变化

量。作为对照的重度石漠化区0—30 cm层LFOC储量为 0.06 kg/m^2 ,植被恢复5,10,15,20 a后,其0—30 cm层LFOC储量分别为重度石漠化区的2.5,5.5,8.33,24倍,表明植被恢复对LFOC储量的影响要远大于对SOC储量的影响。不同恢复年限土地,其0—10 cm土层中LFOC占0—30 cm土层的比例分别为28.57%,72.94%,72.0%和81.37%,总体上是随着恢复年限的增加,表层LFOC储量的比例增大。



2.3 植被恢复后土壤LFOC占SOC储量的比例

轻组有机碳占土壤有机碳的比例可反映土壤有机碳库的质量高低。与重度石漠化土壤相比,植被恢复后,土壤中LFOC占SOC储量的比例明显增加。作为对照的重度石漠化区0—10 cm层土壤中LFOC占SOC储量的比例仅为6.68%,而经过植被恢复5,10,15,20 a后,LFOC占SOC储量的增加到11.04%,34.35%,41.89%,43.62%(图3)。总体而言,恢复时间越长,LFOC占SOC储量的比例越高。同时,随着土壤层次的加深,LFOC占SOC储量的比例有减小的趋势,说明石漠化土地在进行植被恢复后土壤碳库质量得到一定提高,然而这种提高在较浅的土壤0—10 cm层次表现最明显。

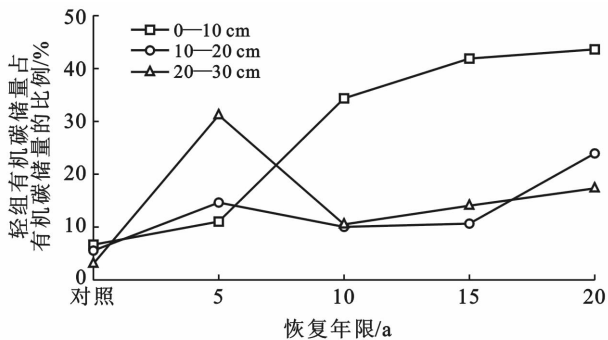


图3 植被恢复后轻组有机碳占土壤有机碳储量的比例变化

3 讨论与结论

3.1 石漠化土地植被自然恢复对土壤有机碳的影响

石漠化土地通过植被自然恢复后其SOC含量和储量明显增加,且其恢复时间越长,SOC含量和储量越高,表层0—5 cm的有机碳含量均高于其他土壤层次,说明石漠化土地进行植被恢复能明显提高土壤有机碳,且这种作用在表层更为明显。这与张文娟等的研究结果一致,张文娟^[17]在贵州的岩溶石漠化区的研究表明,石漠化地区在退耕3 a和退耕15 a后,表层0—10 cm SOC含量显著增加,土壤肥力提高,退耕15 a内0—10 cm SOC含量提高了26.1%。然而,Richter等^[18]通过研究发现,随着植被的生长,其林下SOC储量变化并不明显,原因是荒漠化地区缺乏对凋落物来源有机碳的物理保护作用,温暖的气候加快了凋落物的分解速率,限制了土壤固碳潜力。本研究中,植被恢复始于岩溶生态系统退化的终极阶段—重度石漠化,该阶段多为人为耕种、乱砍滥伐、过度放牧所致,植被自然恢复后,一方面是直接减少了SOC的流失;另一方面随着植被恢复小气候得到改善,繁茂的草本层和郁闭的林冠保护和沉降了大量的土壤细颗粒,土壤的黏粉粒含量增加,而土壤黏粉粒的多少与土壤吸湿水有密切关系,吸湿水对保持与促进生物活动极为有利^[19],强烈的微生物作用,地表凋落物及

植物根系的残留物逐渐分解,其中一部分最终形成土壤腐殖质,使土壤有机质含量增加。本研究结果中 SOC 含量随着植被恢复时间的增加提高的幅度较北方荒漠区小,主要是与对样地的选择有关。本研究中作为对照的重度石漠化土地,其 SOC 比植被恢复 5 a 后土地的 SOC 高,而恢复 10 a 后的土地,其 SOC 基本可以超过植被恢复前的水平。通常情况下认为森林破坏导致 SOC 流失,植被重建增加土壤碳汇。但是,有研究表明森林转变为草地后可导致地上部分生物量碳减少,其土壤有机碳不一定流失,植被变化过程中 SOC 的变化不仅仅取决于变化前后植被类型,还主要与土地利用的历史,现状及管理强度有关。Paul 等^[20]分析了全球多个站点草地造林后 SOC 储量的影响,结果表明,植被恢复后最初 5 a,表层土壤碳逐年降低,随着植被恢复年限的增长,下降速率逐渐变缓,在林龄大于 30 a 的样地中,土壤碳接近先期耕种土壤碳,本研究结果与 Paul 的研究结果基本一致,土壤碳先减小,后到恢复 10 a 已经超过先期的耕种土地。这主要是因为作为对照的重度石漠化土地未进行植被恢复前为种植有任豆树等乔木的农耕地,且砍伐时间较短,前期积累的有机质含量较多,同时每年会有种植作物的枯枝落叶进入土壤,而弃耕进行自然植被恢复初期,通过凋落物和根系等途径输入到土壤的有机物质较少,SOC 含量下降。随着植被恢复时间的增加,有机物质输入量不断提高,SOC 含量逐渐恢复。本研究表明随着植被的恢复,其 SOC 含量呈现先减小而后一直增加的趋势,而在北方岩溶区研究表明,随着植被的恢复,其 SOC 含量会有出现一个最大值,约在植被恢复 15 a 左右,然后 SOC 含量值呈现减小^[21],但是本研究中未出现,这与西南岩溶区较炎热的以及多降雨的条件有关,随着植被的恢复达到 SOC 含量平衡最大值所需的年限较多。

3.2 石漠化土地植被恢复对土壤 LFOC 的影响

轻组有机碳对土地利用变化及农田管理措施的影响比土壤总有机碳更为敏感。土壤 LFOC 数量和组成会随着土地利用方式、植被类型和枯枝落叶层类型及其分解的影响而发生剧烈变化^[22],同时,由于 LFOC 主要来源于植物早期分解阶段中部分未分解的植物残体,因此,其变化可以表征植物残体的腐殖化过程^[23]。本研究表明,植被恢复可以显著增加土壤 LFOC 含量和储量,且表层的增幅高于下层,同时随着恢复时间的增加 LFOC 储量变大。随着植被恢复年限的增加土壤活性有机碳(LFOC)含量明显增加,且随着土壤层次的加深逐渐减小,说明在人为干扰较少的自然恢复模式下有助于土壤活性有机碳的

积累。地上凋落物数量与轻组数量关系密切,Boone^[24]在美国威斯康辛州两个栎树林通过改变凋落物输入数量评价凋落物和根对轻组的相对贡献时认为地上凋落物是土壤轻组的主要来源。气候因子中的水热条件直接影响凋落物分解过程中的淋溶作用和土壤微生物活性,且土壤养分含量越低,凋落物分解越慢。重度石漠化区地表裸露,植被较少,而 LFOC 易分解,因而导致重度石漠化区 LFOC 较低。植被恢复后,地表盖度增加,植被的定居和生长为土壤微生物和动物提供了食物来源和栖息地,植物残体的积累使地表凋落物数量逐渐增加,根系周转向土壤的营养输入也增加了土壤养分。同时西南岩溶区虽然降雨量充沛,但是岩溶地表地下的双层结构使得降雨很快通过地下管道流入地下,造成当地干旱缺水,这种气候条件限制了微生物的活性和凋落物的分解速度,使得土壤微生物的分解速率小于凋落物的输入速率,凋落物不能完全分解,部分堆积在地表,且随着植被恢复的年限的增加而不断输入,因此表层 0—10 cm 的 LFOC 储量高于下层,且恢复时间最长的 20 a 样地中其 LFOC 储量最高。

3.3 植被恢复后土壤 LFOC 占 SOC 储量的比例变化

LFOC 作为土壤中活性较大的碳库,其占 SOC 储量的比例反映了土壤有机碳库的质量高低,但是在不同的地区及不同的植被变化后,其比例变化较大。从重度石漠化区到植被恢复 20 a 的土地,土壤碳储量明显增加。在暖温带地区农田上营造落叶松后,0—110 cm 土层 LFOC 占 SOC 储量的比例为 28.9%~32.8%^[25];而在亚热带红壤侵蚀地人工种植马尾松后,土壤中 LFOC 占 SOC 储量的比例为 29.1%~41.9%^[26],且随植被恢复时间的增加比例逐渐增大;在川西较高海拔下典型植被的研究表明,LFOC 占 SOC 储量的比例仅为 4.0%~13.4%^[27]。而本研究中在平果果化岩溶石漠化区进行植被自然恢复后,其 LFOC 占 SOC 储量的比例为 10.03%~43.6%,尤其是表层 0—10 cm 恢复 20 a 后其 LFOC 占 SOC 储量的比例可达 43.6%,且随着植被恢复时间的增加,该比例逐渐增大。但作为对照的重度石漠化区 LFOC 占 SOC 的比例较小,这主要与植被恢复前的土地利用方式有关,本研究选择的重度石漠化区,为种植了火龙果的耕地,一方面火龙果为仙人掌科三角柱属植物,它本身的凋落物就很少,另一方面早有研究表明耕作能够减少土壤轻组有机碳含量^[28],因而 LFOC 占 SOC 的比例较农田和湿地低。进行植被恢复后,因为植被的生长建立了凋落物和细根的物质循环途径,为轻组有机碳提供了物质来源,其 LFOC 占 SOC 的比例持续增长。有学者研究发现土壤有机碳最易

受土地利用变化的影响,并且随着土层加深土壤轻组有机碳库所占比例减小,本文的结果与其研究结论一致。

在岩溶石漠化区,通过自然的植被恢复可以增加地表覆盖度,改善土壤机械组成及容重,且凋落物的积累和草本植物根系的周转提高了土壤有机碳及轻组有机碳组分的碳储量,其中植被恢复 20 a 以上的林地土壤有机碳和轻组有机碳储量均为最高,这充分说明自然恢复可以有效防止土地石漠化,增加碳的流通,今后应加强在石漠化地区封山育林工作,在减少石漠化的同时进行固碳增汇。

[参 考 文 献]

- [1] Wu Tianyun, Schoenau J J, Li Fengmin, et al. Effect of tillage and rotation on organic carbon forms of Chernozemic soils in Saskatchewan[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166(3):328-335.
- [2] Laik R, Kumar K, Das D K, et al. Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2):71-78.
- [3] Tan Zhengxi, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1):53-59.
- [4] 谢锦升,杨玉盛,杨智杰,等.退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3):557-563.
- [5] 陈银萍,李玉强,赵学勇,等.放牧与围封对沙漠化草地土壤轻组及全土碳氮储量的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4):182-186.
- [6] 曾宏达,杜紫贤,杨玉盛,等.城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3):701-706.
- [7] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9):19-25.
- [8] 李阳兵,王世杰,容丽.关于中国西南石漠化的若干问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6):593-598.
- [9] 但新球,屠志方,李梦先,等.岩溶地区石漠化现状分析[J]. *中南林业调查规划*, 2013, 32(1):59-62.
- [10] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):618-623.
- [11] 蒋忠诚,李先琨,覃小群,等.论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术:以广西平果果化示范区为例[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(1):50-55.
- [12] 徐杰,邓湘雯,方晰,等.湘西南石漠化地区不同植被恢复模式的土壤有机碳研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6):171-174.
- [13] 胡宁,袁红,蓝家程,等.岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(24):7393-7402.
- [14] 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.
- [15] 宋希娟,王克林,刘淑娟,等.桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征[J]. *湖南农业大学学报*, 2013, 39(6):655-659.
- [16] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6):1799-1806.
- [17] 张文娟,廖洪凯,龙健,等.贵州喀斯特山区土地利用对土壤有机碳及其周转速率的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5):1297-1303.
- [18] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, et al. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest[J]. *Nature*, 1999, 400(6739):56-58.
- [19] 章程.典型岩溶泉流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4):165-169.
- [20] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1):241-257.
- [21] 王惠,张珊珊,杨宝山,等.石灰岩山地恢复植被演替中土壤有机碳质量分数及影响因素[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(4):91-94.
- [22] Compton J E, Boone R D. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7):933-943.
- [23] Leifeld J, Knabner K I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1):143-155.
- [24] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11):1459-1468.
- [25] 吴建国,张小全,王彦辉,等.土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. *林业科学*, 2002, 38(4):19-29.
- [26] 吕茂奎,谢锦升,周艳翔,等.红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):37-44.
- [27] 向成华,栾军伟,骆宗诗,等.川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. *生态学报*, 2010, 30(4):1025-1034.
- [28] Dalal RC, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland (V): Loss of total nitrogen from different particle-size and density fractions[J]. *Soil Research*, 1987, 25(4):461-472.